

## 유한요소해석에 의한 연약지반 상 보강토 옹벽에 대한 적정 치환깊이 검토

### Investigation of Proper Replacement Depth for the Reinforced Earth Wall on a Soft Ground by Finite Element Analysis

이 병 식<sup>1</sup> Lee, Byung-Sik

#### Abstract

For the reinforced earth wall constructed on a soft ground in parallel with replacing soft soils, the behavior of the wall according to variations of thickness and stiffness of soft layer, replacement depth, and wall height is investigated using a finite element method, in which incremental construction steps including consolidation of soft soil layer are considered. The behavior of wall is characterized by investigating displacements and settlements developing at the wall, and shear strains developing in a soil deposit. The stability of wall is, then, evaluated by comparing these values with the safety criteria determined on the basis of the literature. Based on the investigation, it is shown that the behavior of wall is influenced naturally from soft soil thickness ( $t$ ), replacement depth ( $d$ ) and wall height ( $h$ ), but more significantly from  $d$  and  $h$ . In addition, it is also shown that the normalized replacement depth,  $d/h$ , required for the safety of wall is not influenced significantly by the variations of  $t$  and  $h$ . Consequently, it can be concluded that the proper replacement depth can be suggested in an equivalent value in terms of  $d/h$ , even for the cases where the wall height is varying with stations, but the variation is not significant.

#### 요 지

치환공법을 적용하여 연약지반 상에 시공되는 보강토 옹벽에 대해 연약지반의 두께 및 강성, 치환깊이와 옹벽높이의 변화에 따른 옹벽의 거동을 연약지반 압밀현상과 시공단계를 함께 고려하는 유한요소해석으로 검토하였다. 옹벽의 거동은 벽체에 발생하는 변위와 침하량, 옹벽 기초지반에 발생하는 전단변형율로 표현하였다. 거동에 따른 옹벽의 안정성은 변위와 전단변형율의 한계값을 문헌연구로부터 정하고 이를 기준으로 평가하였다. 해석결과로부터, 옹벽의 거동은 연약지반 두께( $t$ )와 강성, 치환깊이( $d$ ), 옹벽높이( $h$ )의 변화에 따라 모두 영향을 받지만, 특히  $d$ 와  $h$ 의 변화에 민감한 것을 규명하였다. 또한, 옹벽의 안정성 유지를 위해 요구되는  $d/h$  값은  $t$ 와  $h$ 의 변화에 대하여 크게 영향을 받지 않음을 보였다. 이러한 결과로부터 연약지반 상 보강토 시공 구간 내에서 옹벽 높이가 변화하지만 그 변화정도가 극심하지 않은 경우에, 적정 치환깊이를  $d/h$ 로 나타낸 일률적인 값으로 제안할 수 있다는 결론을 얻었다.

**Keywords :** Finite element analysis, Reinforced earth wall, Replacement depth, Replacement of soft ground

#### 1. 서 론

옹벽의 안정성을 유지하기 위해 연약지반 치환공법

을 적용하는 현장사례가 많다. 이 때 옹벽의 안정성을 유지할 뿐만 아니라 시공의 경제성을 제고하기 위해서는 소요되는 연약지반의 치환영역을 검토하여 적정하

<sup>1</sup> 정희원, 공주대학교 건설환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Kongju National Univ., blee@kongju.ac.kr)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

게 지정해 줄 필요가 있다. 건설현장에서는 적절한 검토 과정 없이 경험적으로 치환영역을 정해 시공하는 경우가 있고, 이로 인해 과다치환으로 인한 경제성 저하나 과소치환으로 인한 위험성 요인이 잠재되어 있다. 해석적 검토를 수행하는 경우에도, 옹벽의 높이가 구간에 따라 변화하고, 연약지반의 조건이 변화하는 다양한 현장 조건에 대해 조건이 다른 모든 단면에 대한 검토를 시행하여 적정 치환영역을 제안하기에는 과도한 노력과 비용이 따른다.

벽체에 발생하는 변위와 침하량, 옹벽 기초지반에 발생하는 전단변형을 등으로 나타낼 수 있는 옹벽 거동에 영향을 미치는 영향인자들, 예를 들면 연약지반 두께, 옹벽 높이, 연약지반 물성 등의 변화에 대한 옹벽거동의 관계를 확정할 수 있다면 그래프나 표를 이용하여 적정 치환영역을 직접 구할 수 있는 방법이 제안될 수 있을 것이다. 그러나 영향인자들의 변화에 따른 옹벽의 거동은 매우 다양하고, 영향인자들의 변화 및 조합 또한 무한하기 때문에 이들 관계를 완벽하게 확정하기는 불가능하다. 하지만 영향인자 변화에 따른 옹벽거동의 추세와 나아가 적정치환영역의 변화 추세를 개략적으로라도 사전에 인지하고 있다면 경험적 설계나 해석적 설계를 수행하는 과정에서 적은 노력으로 보다 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.

이러한 배경에서 본 연구에서는 연약지반 상에 시공되는 보강토 옹벽에 대해서 연약지반 치환에 따른 옹벽 거동의 추세를 시공단계와 연약지반의 압밀을 고려한 유한요소해석으로 검토하였다. 연약지반 두께와 강성, 옹벽 높이, 치환깊이 등을 변화시킨 보강토 옹벽들에 대한 해석결과로부터 옹벽 거동의 추세를 검토하고, 옹벽 안정성을 유지하기 위해 필요한 적정 치환깊이의 변화 추세를 검토하여 자료화하였다.

## 2. 해석대상 보강토 옹벽 시스템

해석 및 결과 분석의 편의를 위해서 연약지반 보강토 옹벽 시스템을 그림 1에 나타낸 바와 같은 해석단면으로 단순화하였다. 여기서, 보강토 옹벽의 뒷채움에 연한 성토층은 해석결과에 영향을 미치지 않을 충분한 영역까지 고려하였으며, 보강토 옹벽은 성토층과 함께 1m 두께로 단계적으로 시공되고, 보강재의 수직간격은 옹벽높이에 관계없이 1m인 조건으로 가정하였다. 뒷채움 폭과 인장재의 길이는 옹벽높이의 0.8배로 정하였다. 치환폭의 변화를 영향인자에서 배제하기 위해서, 치환폭은 옹벽의 거동이 연약지반 횡방향 거동에 영향을 미치지 않고, 치환영역 하부의 연약지반 내에서 발생하는 전단변형이 지표면까지 발달하는 것을 연약지반 치환으로 인해서 방지할 수 있을 정도로 비교적 넓게 가정하였다. 이와 같은 가정 하에 치환영역은 그림 1에서와 같이 뒷채움의 뒷단으로부터 시작하여 뒷채움폭의 1.5배가 되는 폭으로, 치환영역의 바닥에서 시작하여 1:1의 기울기로 지표면까지 연장하여 얻는 비교적 큰 영역으로 시공되는 것으로 가정하였다.

그림 1의 해석단면에 대해서 연약층의 두께( $t$ )와 강

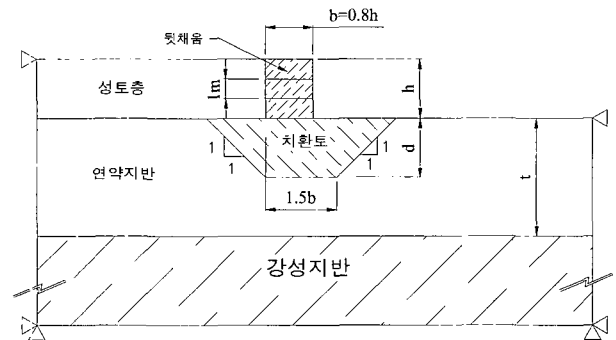


그림 1. 연약지반 상 보강토 옹벽 시스템의 모델링

표 1. 보강토 옹벽 해석대상 시스템 종합

t (m)	6												10			14.4				
	0			1.5	2	3			4	4.5	6			0	3	6	0	3	6	
강성 h (m)	S	M	T	M	M	S	M	T	M	M	S	M	T	M	M	M	M	M	M	M
1.5	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3.0	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.0	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5.0	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6.0	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

※ 연약지반 강성 - S: 연약, M: 중간, T: 굳음

표 2. 연약지반 강성에 따른 수정 Cam-clay 모델 물성치

구분	$\lambda$	M	$c_c$	$\phi'$ (°)
연약	0.13	1.0	0.30	25.4
중간	0.09	1.3	0.21	32.3
굳음	0.06	1.6	0.14	39.2

※  $C_c = 2.303\lambda$ ,  $\phi' = \sin^{-1}(\frac{3M}{6+M})$

성, 옹벽높이( $h$ ), 치환 깊이( $d$ )를 변화시킨 조건들에 대한 유한요소해석을 수행하고 옹벽의 거동을 검토하였다. 본 논문에서 수행한 해석단면들은 연약지반 두께 및 강성, 치환깊이, 옹벽높이의 조합에 따라 구성한 총 105개 단면이며, 이들 단면을 영향인자의 조합에 따라 정리하면 표 1과 같다.

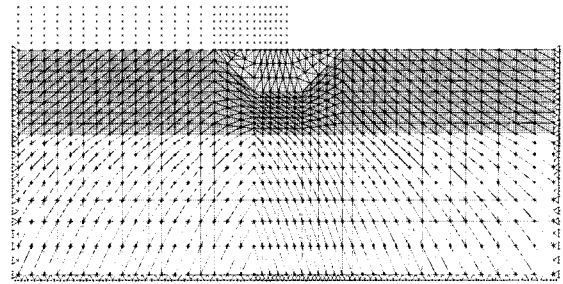
표 1에서 연약지반의 강성을 편의 상 연약, 중간, 굳음으로 구분하였으며, 강성은 유한요소해석의 수정-Cam Clay모델의 물성치 중 정규압밀선의 기울기( $\lambda$ )와 한계상태선의 기울기(M) 값을 변화시켜 조절하였다. 이들 두 가지 물성치를 표 2에 정리하였으며, 같은 표에 참고로 이들 값으로부터 계산한 압축지수와 배수내부마찰각을 비교하였다.

### 3. 유한요소 해석

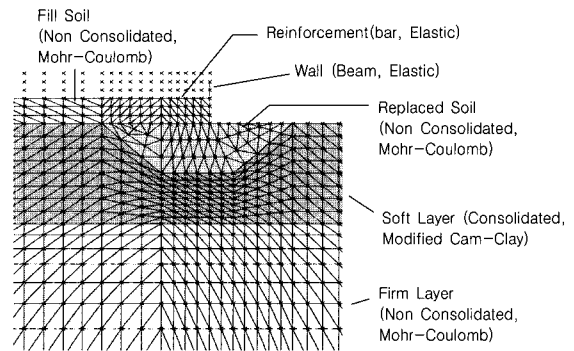
유한요소해석은 범용해석프로그램인 CRISP2D(Woods and Rahim, 2006)를 사용하여 2차원 평면변형조건으로 해석하였다. 대표적인 단면에 대해서 해석에 적용한 유한요소망의 예를 그림 2에 보였으며, 같은 그림에 해석 단면을 구성하는 각 재료들에 대해 적용한 응력-변형 모델과 요소들을 함께 나타냈다(그림 2(b)). 여기서 연약지반을 제외한 벽체, 보강재, 성토체, 기초지반 등의 요소들에 적용한 물성치는 기존 연구결과(신명환, 2005)를 참고하여 적용하였다. 연약지반층의 배수조건은 양면 배수로, 지하수위는 지표면에 있는 것으로 가정하였다.

유한요소해석은 주어진 지반조건에서 초기응력을 설정하는 단계로부터 시작하여, 성토, 구조물(보강재, 벽체 등) 설치, 압밀 등으로 구성되는 단계별 해석으로 수행되었다. 그림 2에 보인 바와 같이 해석단계는 각 성토층에 대해서 보강재 및 벽체 시공 → 성토 → 압밀의 단계를 반복하여 소요 높이까지 시공하는 과정을 모사한다.

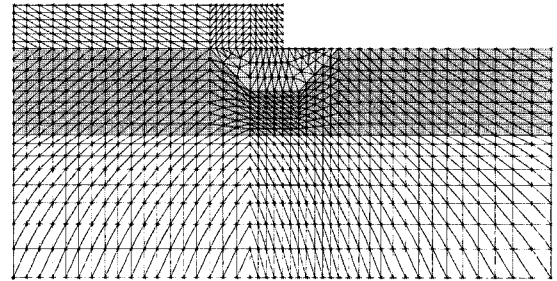
각 해석단계에서 성토에 의한 하중변화와 이로 인한 압밀현상은 점증적으로 발생하는 것으로 가정하였으며 실제 예상되는 지속시간을 해석에 고려하였다. 최종 해



(a) 경계조건과 초기단계



(b) 2단계 성토 후 벽체 및 인장재 시공단계



(c) 최종 성토 및 압밀 단계

그림 2. 시공 및 압밀단계에 따른 유한요소망과 모델링(연약층 두께 6m, 옹벽높이 3m, 치환깊이 3m인 경우)

석결과는 시공기간 54일, 최종 성토층 시공 후 365일 압밀기간 등 시공개시 후 총 419일 후에 발생한 옹벽거동을 중심으로 검토되었다.

### 4. 해석 결과 및 분석

표 1에 정리한 해석대상 단면들에 대해 얻은 유한요소해석 결과를 다음과 같은 내용으로 분석하였다. 첫째로, 본 연구에서 검토한 연약지반 두께, 연약지반 강성, 옹벽 높이 및 치환깊이의 변화에 따른 거동을 분석하여 이들 영향인자의 변화에 따른 옹벽거동의 전반적인 경향을 제시하였다. 둘째로, 옹벽의 안정성을 유지하기 위해 소요되는 연약지반의 치환깊이가 이들 영향인자에 따라 어떻게 영향을 받는지 검토하였다. 이 결과를

기반으로 다양한 조건의 보강토 옹벽들에 대해서 적정 치환깊이를 효과적으로 설정하기 위한 방안을 제안하였다.

#### 4.1 옹벽 거동

##### 4.1.1 변위 양상

전반적인 옹벽의 거동 양상은 변형된 유한요소망을 초기 유한요소망과 비교하여 검토할 수 있다. 대표적인 예로 연약지반 두께 6m, 연약지반 강성은 중간, 옹벽높이 3m, 치환깊이 0m에 대한 해석으로부터 얻은 결과를 그림 3에 나타냈다.

그림 3의 결과로부터 벽체 하단부에서 발생하는 수평 변위는 상단부 수평변위 보다 커서 벽체는 시계반대 방향으로 회전하며 침하하는 양상을 보임을 알 수 있었다. 이러한 현상에 의해서 발생하는 벽체의 기울어짐이 클 경우에 옹벽의 안정성이 유지되지 못할 가능성이 크다. 이에 대한 안정성 평가는 옹벽 상·하단에서 발생하는 수평변위 차를 옹벽의 높이로 나눈 값인 계획선형오차를 이용하여 검토할 수 있다. 계획선형오차는 벽체의 수직도가 최초 계획선으로부터 이탈된 수준을 의미하며, 옹벽의 안정성 유지여부를 오차의 한계값으로 정하여 관리할 수 있다.

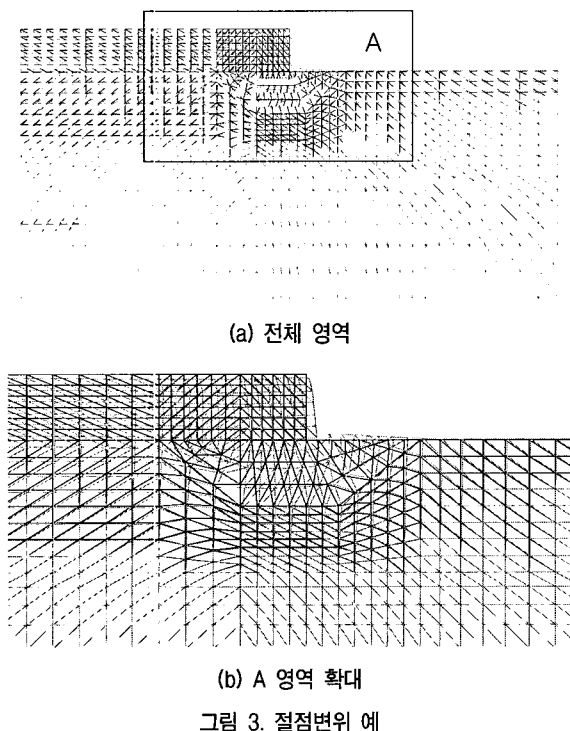


그림 3. 절점변위 예

##### 4.1.2 벽체변위 및 침하량

옹벽높이와 치환깊이가 변화에 따른 옹벽벽체의 거동을 보다 상세히 검토하기 위해, 연약지반 두께와 강성이 각각 6m와 중간인 조건에서 옹벽 높이가 2m, 3m, 4m인 경우에 치환깊이가 변화에 따라 벽체에 발생하는 수평변위의 변화를 그림 4에 비교하였다. 그림의 결과로부터 예상하였던 바와 같이 치환깊이가 증가할수록 수평변위량이 감소함을 알 수 있다. 치환깊이가 증가에 따른 수평변위의 감소율은 옹벽높이에 상관없이 연약지반 두께의 1/2 치환만으로도 크게 증가함을 알 수 있다. 또한, 옹벽의 높이가 상대적으로 낮은 3m 이하 옹벽의 경우에 하단의 수평변위량이 작고, 벽체 상단에서는 음의 값, 즉 벽체가 원위치에서 뒤편으로 이동하는 경우가 발생함을 알 수 있다. 그림 4에 보인 각 경우에 대해서 계획선형오차를 계산하여 같은 그림에 함께 나타냈으며, 이에 대한 검토는 아래 4.2절에서 기술하였다.

표 1에 보인 다른 해석대상 단면들에 대한 해석결과도 위에서 설명한 결과와 유사하게 나타남을 확인하였다. 수직방향으로는 연약지반의 침하로 인해서 모든 해석대상 단면에서 하향으로 변위가 발생하였다.

연약지반 두께, 옹벽높이 및 치환깊이가 변화함에 따른 옹벽거동을 검토하기 위해 해석결과로부터 이들 영향인자와 옹벽 상하단에서 발생하는 수평변위의 변화 관계를 구해 그림 5에 나타냈으며, 이 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

첫째로, 벽체에 발생하는 수평변위와 전체 침하량은 옹벽높이와 치환깊이가 변화에 따라 민감하게 변화하지만, 연약지반 두께에 의한 영향은 상대적으로 작음을 알

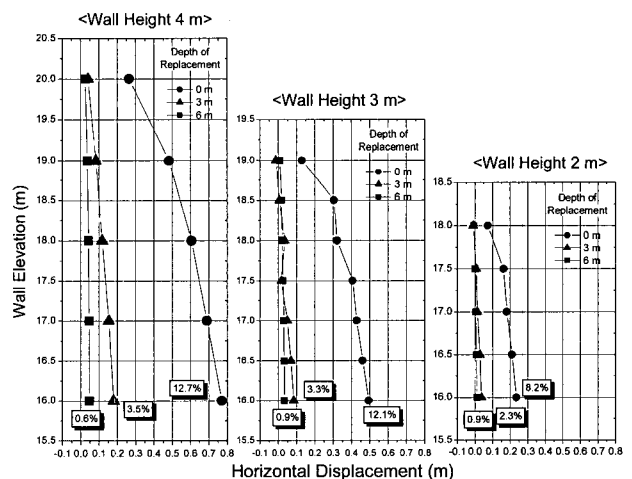
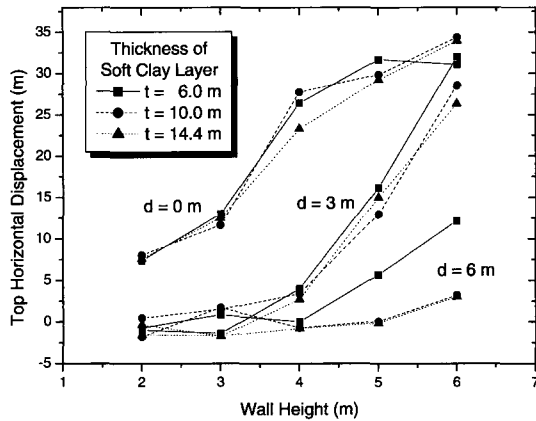


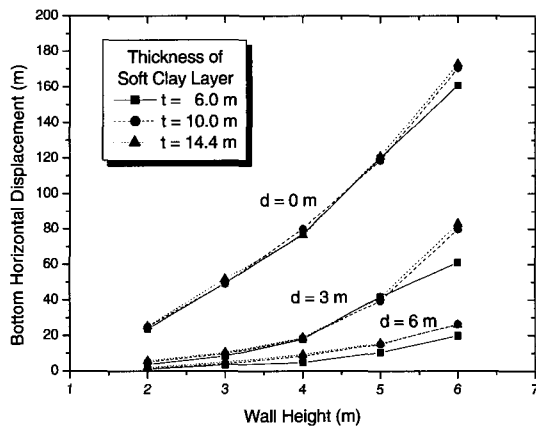
그림 4. 옹벽높이와 치환깊이가 변화에 따른 벽체수평변위와 계획선형오차

수 있었다. 특히 연약지반의 두께가 10m 이상인 경우에  
 옹벽높이가 증가되어도 연약지반 두께 변화가 거동에  
 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.

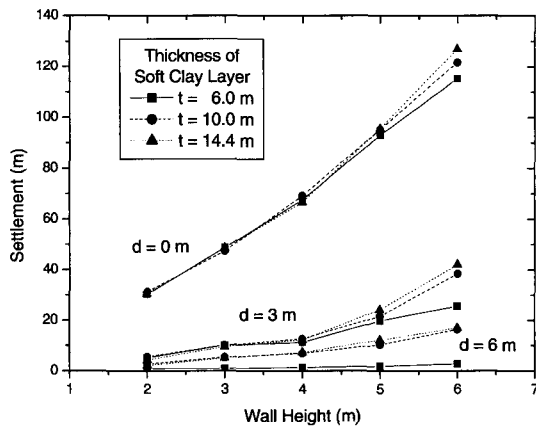
둘째로, 옹벽높이가 증가함에 따라 당연히 변위와 침하  
 량이 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 옹벽높이 4m를  
 기준으로 높은 옹벽과 낮은 옹벽을 구분한다면, 옹벽높이



(a) 벽체 상단 수평변위



(b) 벽체 하단 수평변위



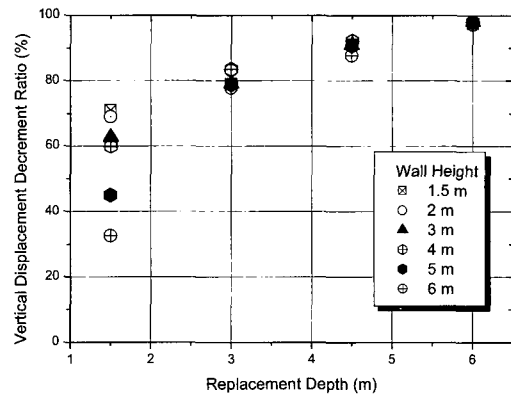
(c) 벽체 기초 침하량

그림 5. 연약지반 두께, 옹벽높이와 치환깊이에 따른 변위 발생량의 변화

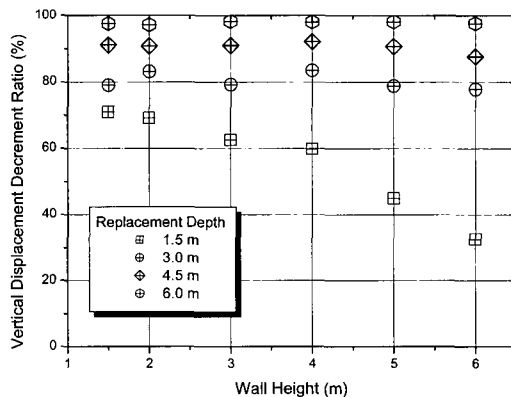
에 따른 변위 및 침하량의 변화관계는 각 구간에서 개략  
 적인 선형비례의 관계를 보이고 있음을 알 수 있었다.

셋째로, 치환깊이가 증가함에 따라 옹벽 변위와 침하  
 량 감소로 인한 옹벽의 안정성 개선 효과를 얻을 수 있  
 음을 알 수 있었다. 안정성 개선효과는 그림 5의 결과에  
 서 나타난 바와 같이 치환깊이가 증가함에 따라 점차로  
 낮아지는 것으로 추정할 수 있었다. 이러한 현상을 보다  
 상세히 검토하기 위해서 연약지반 두께 6m인 경우에 대  
 해서 옹벽높이와 치환깊이가 변화에 따른 침하량 감소율  
 의 변화를 검토한 결과 그림 6의 결과를 얻었다. 여기서  
 침하량 감소율은 치환에 의해 감소하는 침하량을 치환  
 하지 않는 경우(0m)에 발생하는 침하량에 대비한 백분  
 율로 정의하였다.

그림 6(a)의 결과로부터 치환깊이 증가에 따라 침하  
 량 감소율은 증가하고 있지만, 치환깊이가 3m 이상 이  
 되는 경우에 치환깊이가 증가하여도 침하량 감소율은 크게  
 증가되지 않음을 알 수 있었다. 그림 6(b)에 나타난 옹벽  
 높이 변화에 따른 침하량 감소율의 변화 결과로부터 옹벽  
 의 높이가 작을수록 상대적으로 얇은 치환깊이에 대해서



(a) 치환깊이의 영향



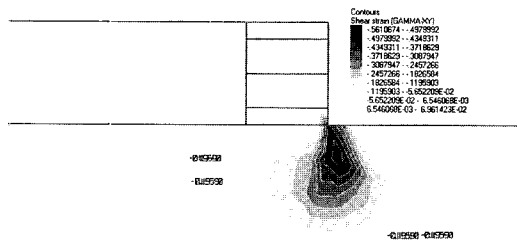
(b) 옹벽높이의 영향

그림 6. 옹벽높이와 치환깊이에 따른 변위감소율의 변화

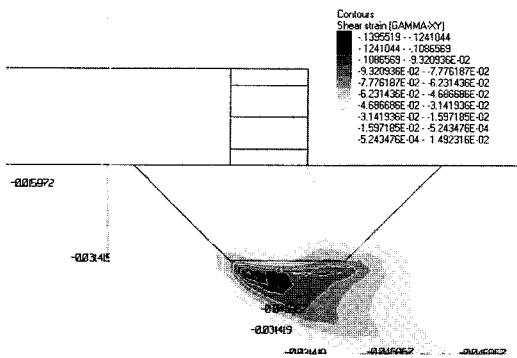
도 침하량 감소율이 크지만, 치환깊이가 3m 이상이 되는 경우에 침하량 감소율은 옹벽 높이에 관계없이 낮아짐을 알 수 있었다. 따라서 적절한 검토 없이 치환깊이가 결정되는 경우에 과도한 치환깊이를 적용하게 될 가능성이 커지고, 이 경우 공사비 대비 안정성 개선효과가 낮아 공사의 경제성을 확보하지 못할 우려가 커질 것으로 예상되었다.

#### 4.1.3 전단변형율

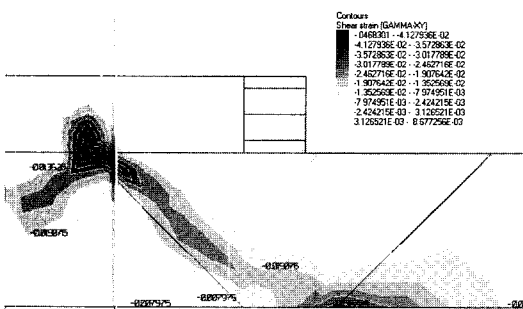
치환깊이의 변화에 따라 옹벽의 기초지반에 발생하는 전단변형율 변화의 예로 연약지반 두께 6m, 연약지반 강성은 중간, 옹벽높이 3m인 경우에 대한 결과를 그



(a) 치환깊이 0m



(b) 치환깊이 3m



(c) 치환깊이 6m

그림 7. 전단변형을 분포 예(연약지반 두께 6m, 중간 강성, 옹벽높이 3m)

림 7에 보였다. 그림의 결과로부터 연약지반 치환을 하지 않는 경우(그림 7(a))에 옹벽 하부선단에서 큰 전단변형율(50% 이상)이 발생하므로 옹벽의 안정성이 확보되지 않음을 알 수 있었다. 치환깊이가 3m인 경우(그림 7(b))에는 약 10%이상의 전단변형율이 치환영역 바닥면에 인접한 연약지반 내에서 발생하지만 옹벽하부 선단에서는 4%미만의 전단변형율이 일부 영역에서 국한되어 발생하였다. 따라서 전단변형이 지표면까지는 발달하지 않고 기초지반 영역에서 전단변형에 의한 파괴면이 형성되지 않아 옹벽의 안정성이 유지될 것으로 판단되었다. 치환깊이가 6m인 경우(그림 7(c))에는 전 영역에서 전단변형율이 5% 미만으로 감소하였다. 표 1에 보인 해석대상 단면에 대한 해석결과, 전단변형의 발생 크기와 분포 양상은 치환깊이 뿐만 아니라 연약지반 두께와 강성, 옹벽높이 등에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 옹벽의 안정성을 유지하기 위해서는 기초지반 전역에서 전단변형율을 규정된 한계값 이하로 유지되고 전단변형에 의한 파괴면의 형성이 억제되어야 할 것으로 판단되었다.

#### 4.1.4 과잉간극수압의 변화

시공단계와 압밀현상을 고려하는 해석결과와 신뢰도를 확인하기 위해서 연약지반 두께 6m, 연약지반 강성은 중간, 옹벽높이 3m인 경우에 대해서 구한 성토부 연약지반 중앙점에서 발생한 과잉간극수압의 시공단계별 변화를 그림 8에 보였다. 또한 성토완료 직후와 최종 압밀단계 후 지반 내에 발생한 과잉간극수압의 분포를 그림 9에 보였다. 이들 그림의 결과로부터 시간에 따른 과잉간극수압의 소산현상을 확인할 수 있었으며, 따라서 유한요소해석에서 압밀현상이 적절히 고려되고 있음을

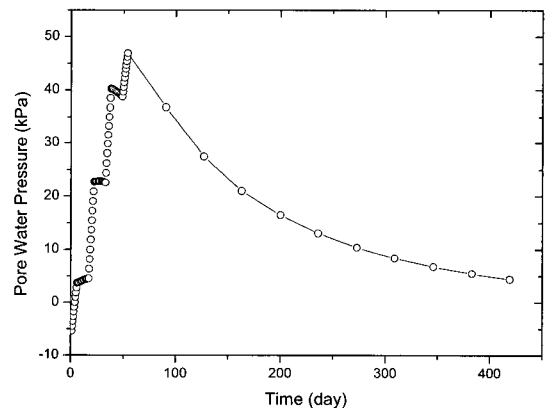
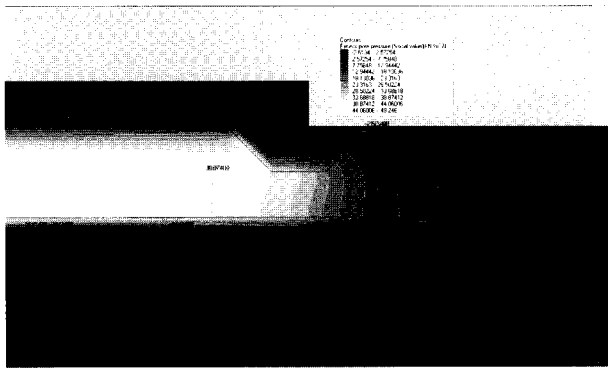
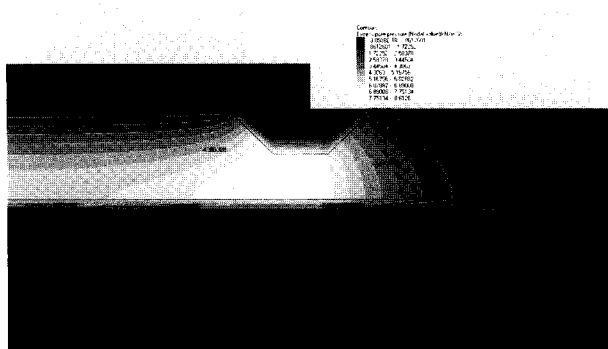


그림 8. 연약지반 중앙깊이에서 발생하는 시공 단계 및 시간에 따른 과잉간극수압의 소산



(a) 최종 성토 직후



(b) 365일 압밀 후

그림 9. 시간에 따른 과잉간극수압의 분포 변화

확인할 수 있었다. 또한, 최종 압밀단계에서 과잉간극수압이 완전소산으로 수렴하는 현상을 보이고 있어 압밀을 고려한 양호한 해석결과를 얻었음을 알 수 있었다.

#### 4.2 적정 치환깊이

적정치환깊이는 옹벽에 발생하는 변위와 침하량 등이 임의의 한계값 내에서 발생하도록 제한하여 옹벽의 안정성을 유지할 수 있는 조건을 형성하기 위한 최소의 치환깊이로 정의하였다. 적정 치환깊이를 결정하기 위해서는 우선 옹벽의 안정성을 평가하기 위한 평가항목과 안정성 유지를 담보하는 각 항목에 대한 한계값 설정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 옹벽의 안정성을 평가하기 위한 평가항목과 한계값을 문헌에 나타난 선행 연구결과(한국시설안전기술공단, 2003; 황선근 등, 2003; Tennessee DOT, 2004)를 인용하여 결정하였다. 선행 연구결과에서 옹벽의 안정 조건은 대체적으로 벽체의 변위에 근거한 계획선형오차, 침하량, 활동량 등의 평가항목에 대한 한계값으로 제안되고 있는 것으로 나타났다. 이러한 안정기준은 연구자마다 다소 차이가 있지만 이를 토대로 본 연구

표 3. 옹벽의 안정기준과 한계값

평가항목	한계값
수평 변위	h의 2% 미만
침하량	h의 3% 미만
계획선형 오차	5% 미만
전단 변형율	벽체 하단 지표면 5% 미만

에서 적용할 안정기준을 표 3과 같이 결정하였다.

앞서 검토한 바와 같이 옹벽거동에 대한 연약지반 두께의 영향이 본 연구에서 검토한 경우들에 대해서는 비교적 작은 것으로 나타났으므로, 여기서는 옹벽높이(h)와 연약지반 물성치의 변화에 대한 적정치환깊이의 변화를 검토하고자 한다. 이를 위해 연약지반 두께가 6m이고 강성은 중간인 조건에서, 치환깊이가 변화하고 옹벽높이가 2m, 3m, 4m, 5m, 6m로 변화하는 경우에 표 3에 보인 각 평가항목 값들이 나타내는 변화 분포를 구해 그림 10에 보였다.

그림 10(a)에서 옹벽높이와 치환깊이의 변화에 따라 벽체 상단에서 발생하는 수평변위의 분포를 나타내는 등고선을 볼 수 있다. 이 등고선은 같은 그림에 함께 나타난 바와 같은 옹벽높이와 치환깊이의 변화 조합에 따른 12개의 경우에 대해 구한 변위량 자료로부터 생성된 것이다. 각 옹벽높이에 대해서 안정성을 유지하기 위한 조건으로 표 3에 보인 평가기준(h의 2% 미만)을 적용할 때 수평변위의 한계값은 2m, 3m, 4m, 4m, 5m, 6m 높이에 대해서 각각 4cm, 6cm, 8cm, 10cm, 12cm로 정할 수 있었다. 이들 한계변위값을 기준으로 그림 10(a)에 보인 등고선 자료로부터 각 높이의 옹벽에 대한 적정치환깊이를 각각 3.4m, 3.7m, 3.5m, 3.8m, 4.2m로 추정할 수 있으며, 이들 결과를 같은 그림에 표기하였다. 그림 10(b)~10(d)까지 보인 평가기준항목들에 대해서도 이와 같은 방법으로 적정치환깊이를 추정하여 같은 그림에 각각 나타냈으며, 이들 결과를 종합하여 표 4에 정리하였다.

표 4의 결과로부터 본 연구에서 다른 조건의 옹벽에 대해서는 옹벽의 안정성이 벽체의 수평변위 혹은 기초지반에 발생하는 전단변형율에 크게 좌우됨을 알 수 있었다. 예를 들어 높이 2m의 옹벽에 대해서는 적정치환깊이를 벽체 상단 수평변위의 한계값을 기준으로 적용하여 3.4m로 구할 수 있었다(표 4에 굵은 체로 구분 표시). 반면에 옹벽높이가 비교적 큰 5m와 6m의 경우에는 전단변형율이 한계값 내에 있어야 하는 조건에 따라 치환깊이가 정해졌다. 그러나 이들 경우에 연약지반 두께

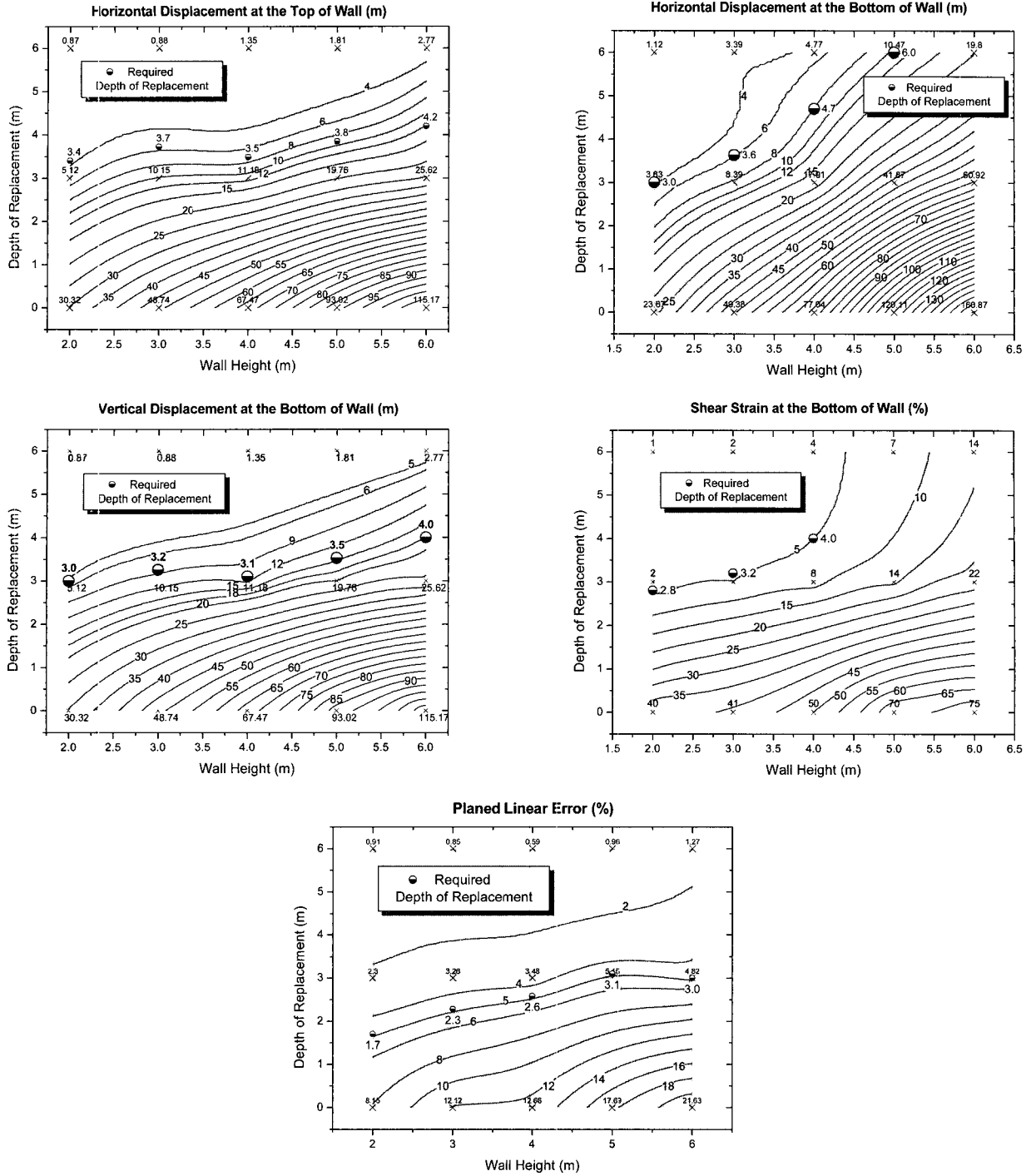


그림 10. 옹벽높이와 치환깊이 변화에 따른 안정성 평가항목 값의 변화

표 4. 안정기준에 따른 옹벽높이 별 적정치환깊이 (단위 : m)

항목 \ 옹벽높이(m)	2	3	4	5	6
상단 수평변위	3.4	3.7	3.5	3.8	4.2
하단 수평변위	3.0	3.6	4.7	6.0	6.0 이상
침하량	3.0	3.2	3.1	3.5	4.0
계획선형 오차	1.7	2.3	2.6	3.1	3.0
전단 변형률	2.8	3.2	4.0	6.0 이상	6.0 이상



와 동일한 치환깊이를 적용하여도 전단변형을 혹은 하단수평변위(6m의 경우)의 한계값을 만족할 수 없었다. 이 경우에 대해서는 치환폭을 더 증가시키거나 구조적 연약지반 공법을 적용하여야 할 것으로 판단되었다.

표 4의 결과에서 주목하여야 할 점은 옹벽높이가 상대적으로 낮은 경우인 4m이하의 옹벽에 대해서 옹벽높이 변화에 따른 적정치환깊이의 변화 추세이다. 이들 경우에 대해서 적정치환깊이를 옹벽높이에 대해 정규화한 값은 최소 1.2(높이 4m의 경우)로부터 최대 1.7(높이 2m인 경우)로 구해졌으며, 이들 값의 변화폭이 옹벽높이의 변화량과 대비하여 작게 나타났다. 한편, 옹벽높이 5m와 6m의 경우에 대해서도 그림 10의 결과로부터 옹벽높이 증가함에 따른 변위 및 전단변형율의 증가 현상이 비교적 크지 않음을 알 수 있었다. 이들 경우에 대해서 그림의 결과만으로는 명확한 적정치환깊이를 결정할 수 없지만, 개략적으로 적정치환깊이는 옹벽높이의 2배를 넘지는 않을 것으로 추정할 수 있었다. 결과적으로 적정치환깊이는 옹벽높이에 따라 증가하지만 이를 옹벽높이에 대해서 정규화한 값( $d/h$ )으로 고려할 경우에 이들 값의 변화폭은 크지 않을 것으로 추정되었다.

연약지반 강성이 변화하는 경우에도 역시 적정치환깊이가 변화될 것이다. 이러한 추세를 살펴보고, 적정치환깊이에 대해 연약지반 강성이 미치는 영향을 검토하기 위해 그림 10에 보인 경우들에 대해서 연약지반의 물성치만 변화시켜 해석한 결과로부터 얻은 변위분포를 그림 11에 보였다.

연약지반의 강성을 증가시킨 경우인 그림 11(a)의 결과를 보면 모든 옹벽높이의 경우에 대해서 적정치환깊이

는 옹벽높이와 유사한 값으로 결정됨을 알 수 있었다. 강성이 감소된 경우에 대한 결과인 그림 11(b)을 보면 적정치환깊이가 옹벽높이의 1.5배 내지 2배 정도로 구할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과를 앞서 보인 연약지반 강성이 중간인 경우의 결과와 비교하면, 그림 11의 결과를 얻기 위해 연약지반의 강성을 상당히 변화하였음에도 불구하고 대체적으로 적정치환깊이를 옹벽높이에 대해 정규화한 값( $d/h$ )의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

이상의 결과들을 바탕으로 적정치환깊이는 옹벽높이에 대한 정규화 값( $d/h$ )으로 규정하여도 무리가 없을 것으로 추정되었다. 또한 일반적인 연약지반 강성 범위 내에서  $d/h$  값은 옹벽높이의 변화에 대해 크게 변하지 않으며, 개략적으로 약 1.2~2 범위 내에서 정해질 수 있을 것으로 추정되었다.

옹벽높이가 구간에 따라 변화하는 경우에 모든 옹벽높이 단면에 대한 해석과정을 통해 적정 치환깊이를 지정하여 주기에는 과도한 시간과 비용이 소요된다. 그러나, 위의 결과에 따르면, 옹벽높이의 변화 정도가 매우 과다하지 않은 구간에 대해서는 적정치환깊이를 옹벽높이에 대해 정규화한 값( $d/h$ )으로 일률적으로 규정하여도 무난할 것으로 예상되었다.

위 제안의 타당성을 보다 명확히 검토하기 위해서 연약지반 두께가 6m이고, 강성이 중간 혹은 연약한 경우로 변하는 경우들에 대해서 치환깊이를 옹벽높이에 대한 정규화 값( $d/h$ )과 옹벽높이( $h$ )의 변화에 따른 벽체상단에 발생하는 수평변위의 변화양상을 보다 상세히 구한 결과를 그림 12에 보였다. 그림의 결과에 대해서 표 3에 보인 한계값( $h$ 의 2% 미만)을 적용하여 옹벽의 안정

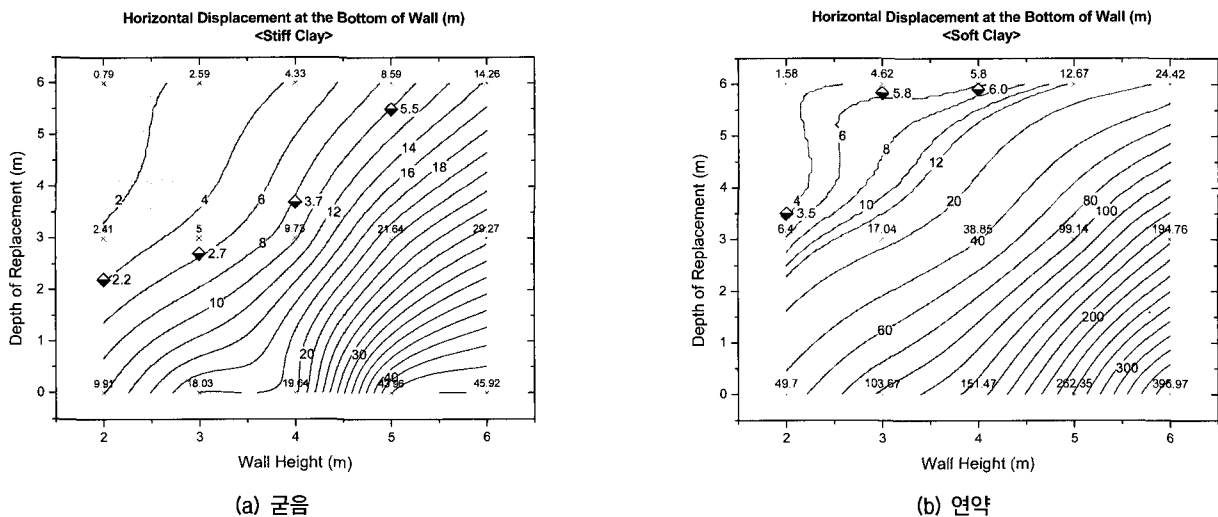
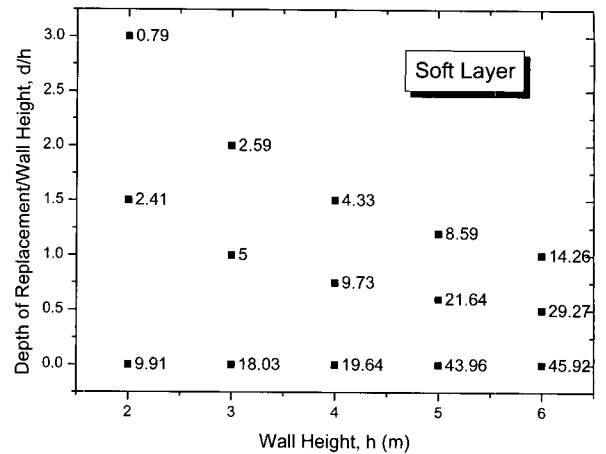
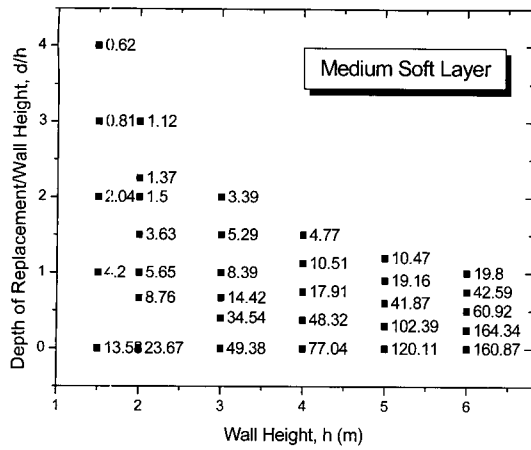


그림 11. 연약지반의 강성변화에 따른 벽체 하단 수평변위의 변화



(a)

(b)

그림 12. 옹벽높이와 치환깊이 변화에 따른  $d/h$ 의 변화

성을 유지할 수 있는  $d/h$  값을 구해 그 변화를 살펴보면, 두 경우 모두  $d/h$ 의 기울기가 수평 영역에서 크게 벗어나지 않는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결론

연약지반 상에 시공되는 보강토 옹벽의 안정성을 유지하기 위해 치환공법을 적용하는 경우에 옹벽의 거동을 분석하고 이를 바탕으로 적정치환깊이 제시 방안에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 논문에서 검토한 연약지반 상에 설치되는 보강토 옹벽의 조건에서 벽체의 수평변위는 벽체의 상단보다 하단에서 큰 값으로 발생하여 벽체가 반시계 방향으로 회전하는 양상을 보였다.
- (2) 연약지반의 두께가 개략적으로 옹벽의 높이보다 큰 경우에 옹벽 거동에 미치는 연약지반 두께 변화의 영향은 작은 편으로 나타났다.
- (3) 보강토 옹벽 기초지반에 발생하는 전단변형은 옹벽의 하단부 지반에 집중되고, 연약지반의 강성이 작거나 옹벽높이가 높은 경우에 지표면까지 큰 전단변형이

발달하여 옹벽의 안정성이 유지되지 않았다.

- (4) 적정치환 깊이는 연약지반 강성과 옹벽 높이에 영향을 받지만, 적정치환깊이를 옹벽높이에 대한 정규화 값( $d/h$ )의 변화폭은 크지 않았다. 따라서 옹벽의 높이가 지속적으로 변하는 구간이지만 높이 변화가 심하지 않은 경우에는 적정치환깊이를  $d/h$  값을 사용하여 전 구간에 대해 일률적인 값으로 제안하여도 무리가 없을 것으로 판단되었다. 본 논문에서 살펴 본 옹벽높이가 6m 미만의 경우들에 대해서는 개략적으로 1.2~2 정도의  $d/h$  값으로 적정치환깊이를 제안할 수 있었다.

## 참고 문헌

1. 신명환 (2005), 연약지반에 시공된 보강토 옹벽의 거동해석, 석사학위논문, 공주대학교 대학원.
2. 한국시설안전기술공단 (2003), 옹벽유지관리 매뉴얼.
3. 황선근, 이성혁, 이진욱, 고태훈 (2003), 보강토옹벽의 특성과 철도구조물로서의 적용성 평가를 위한 실험, 한국토목섬유학회지, 제12권, 제2호, pp. 9-15.
4. Tennessee DOT (2004), Earth Retaining Structures Manual.
5. Woods R. and Rahim A. (2006), Technical reference manual for use with CRISP version 5.

(접수일자 2007. 3. 16, 심사완료일 2007. 5. 17)