

캔틸레버 옹벽의 거동에 대한 수치해석적 연구

Numerical Analysis on Behavior of Cantilever Retaining Walls

장 인 성*¹

Jang, In-Sung

정 충 기*²

Chung, Choong-Ki

김 명 모*³

Kim, Myoung-Mo

Abstract

Current methods to estimate the earth pressure for retaining wall analysis are based on Rankine or Coulomb approaches, in which the soil mass behind wall is assumed to reach to failure state with sufficient lateral movements. Some of recent research works carried out by field measurements reveal that the active earth pressures by Rankine or Coulomb method are underestimated. It means that the lateral movements of wall and soil would not be mobilized enough to reach the failure state.

In this study, the finite element method with Drucker-Prager model for soil is employed to investigate the behavior of concrete cantilever retaining wall, together with the influence of inclined backfill. The results indicate that the earth pressures on the retaining wall are strongly related to the mobilized lateral movements of wall and soil and that Rankine and Coulomb methods underestimate the resultant earth pressures and the increasing effect on earth pressure by inclined backfill. Based on this study, a simplified method to determine to earth pressures on cantilever retaining wall with horizontal backfill is proposed.

요 지

현재 옹벽해석에 사용되는 Rankine이나 Coulomb의 토압산정방법은 벽체 뒤의 토사가 파괴 상태에 도달하였다는 가정조건에 근거하고 있으며, 이를 위해서는 충분한 횡방향 변위가 발생하여야 한다. 최근의 현장시험 등을 통한 많은 연구에서는 옹벽에 작용하는 수평주동토압이 Rankine이나 Coulomb의 토압보다 크게 나타나고 있음을 보여주고 있으며, 이는 발생 수평변위량과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

*¹ 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

*² 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 조교수

*³ 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

본 연구에서는 Drucker Prager의 지반구성모델을 이용한 유한요소해석을 통하여 캔틸레버식 옹벽의 벽체지주와 가상배면에 작용하는 수평주동토압을 발생변위와 함께 분석하였으며, 아울러 경사진 뒤채움이 수평주동토압에 미치는 영향도 검토하였다. 그 결과 옹벽에 작용하는 수평주동토압은 발생변위와 밀접한 관계가 있으며, Rankine과 Coulomb의 방법은 작용수평주동토압을 과소평가하고, 경사진 뒤채움의 수평주동토압 증가 효과도 과소평가함을 확인하였다. 그리고 본 해석결과를 토대로 수평주동토압을 간편하게 산출할 수 있는 새로운 방법을 제안하였다.

Keyword : Retaining wall, Earth pressure, Finite element method, Backfill

1. 서론

현재의 옹벽의 해석에서 활동이나 전도를 일으키는 주동토압이나 이에 저항하는 수동토압은 주로 Rankine이나 Coulomb의 토압론에 근거하여 구한다. 그러나 Rankine이나 Coulomb의 토압론에서의 토압은 흙이 소성파괴를 일으킬 수 있을 정도의 충분한 변위가 발생한다는 가정 하에서 산정되기 때문에 실제 옹벽에서의 응력 조건과 다를 수 있다.

정성교(1995), Tsagrelis(1965), 그리고 Coyle과 Bartoskewitz(1974, 1976)가 행한 현장 실험에서 측정된 결과와 Goh(1993)가 행한 수치해석의 결과 등은 옹벽의 벽체와 가상배면에 작용하는 수평주동토압이 Rankine이나 Coulomb이 제안하는 기존의 토압론으로 구한 수평주동토압보다 크게 나타난다는 사실을 보여 주는데, 이는 옹벽에서 실제로 발생하는 횡방향 변위의 크기와 밀접한 관계가 있다.

본 연구에서는 Drucker Prager의 지반모델을 이용한 유한요소해석 프로그램을 사용하여 캔틸레버식 옹벽의 거동을 분석하였다. 수치해석에 의한 토압의 분포를 벽체지주(wall stem)와 가상배면(virtual wall back)으로 나누어 Rankine의 주동토압과 비교하였고, 이때 발생 수평주동토압을 토압유발 변위량의 관점에서 비교·분석하여 변위가 발생수평주동토압에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 그리고 뒤채움흙이 경사진 경우의 발생수평주동토압에 대해서도 기존의 해석법과 함께 수치해석을

통하여 분석하였다.

2. 해석방법

본 해석에 사용된 캔틸레버 옹벽과 기초, 그리고 뒤채움의 단면도가 그림 1에 나타나 있고, 유한요소해석에서 격자요소로 모델링한 그림이 그림 2에 나타나 있다. 그리고 벽체와 기초 흙, 뒤채움흙에 대한 물성치들은 표 1에 나타나 있다. 지반에 관련된 강도 및 변형특성에 관한 값들은 일반적인 사질토의 값들을 추정하여 사용하였으며, Clough와 Duncan(1971)이 사용한 값들과 유사한 값들이다.

표 1에 나타난 자료를 가진 캔틸레버식 옹벽의 전도와 활동에 대한 안전율을 일반적으로 많이 쓰이는 NAVFAC("Foundation", 1982)에 근거하여 구해보면 각각 4.65, 2.40으로 전도와 활동에 대해서 이 옹벽은 안전하다고 할 수 있다.

흙과 벽체를 모델링하는데 있어, 본 해석에서는 8개의 절점을 가진 요소를 하나의 격자로 두고, 적분점(integration point)을 4개로 하여 감소적분(reduced integration)을 행하였다.

본 유한요소해석에서 사용한 지반의 구성모델은 Extended Drucker Prager 모델이고 옹벽은 완전 탄성모델이다. Extended Drucker Prager 모델은 토사와 같이 응력의존형 재료를 모사하는데 많이 사용되며, 관련유동규칙(associated flow rule)에 의한 선형탄성-완전

소성 모델이다.

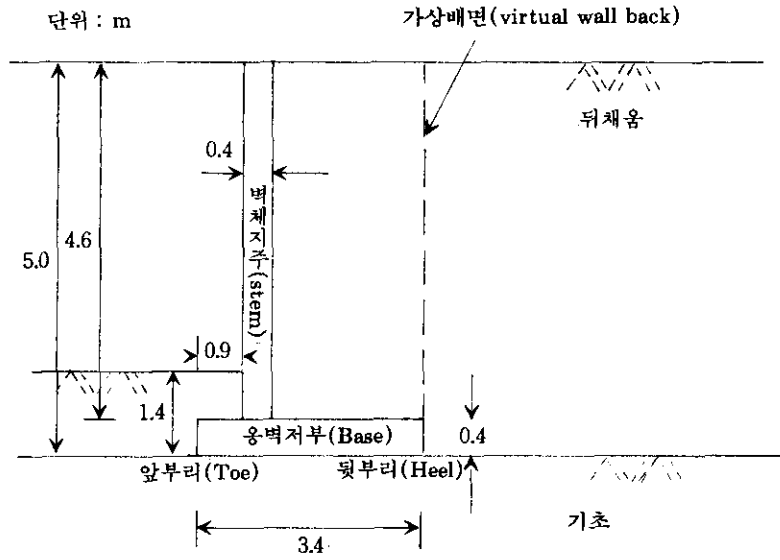


그림 1. 캔틸레버 옹벽의 단면도

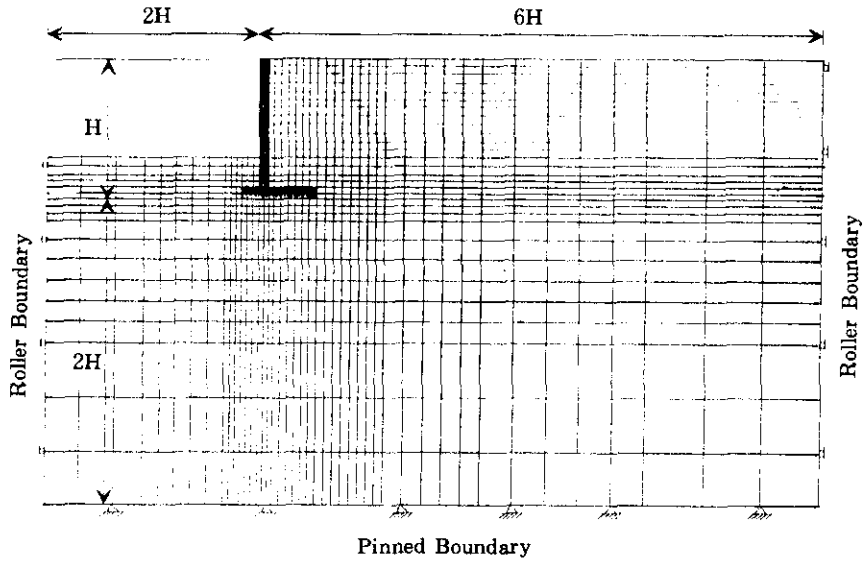


그림 2. 유한요소해석에 사용된 격자요소로 모델링한 단면도

표 1. 옹벽과 기초, 뒤채움의 물성치

물성치	기호	크기		
		뒤채움	기초	옹벽
탄성계수(MPa)	E	40	70	22.77×10^3
포아송비	ν	0.33	0.3	0.17
내부마찰각	ϕ	30	35	.
점착력(kPa)	c	≈ 0.0	≈ 0.0	.
단위중량(kN/m ³)	γ	17.7	19.6	25
정지토압계수	K_0	0.5	0.43	.

3. 해석결과 및 분석

3.1 작용토압의 크기와 분포

앞에서 제시한 옹벽에 대하여 벽체지주(wall stem) 부근과 뒤채움의 가상배면(virtual wall back)에서의 수치해석에 의한 수평주동토압을 Rankine과 NAVFAC의 주동토압, 그리고 정지 토압과 비교한 것이 그림 3에 나타나 있고, 각 위치에서의 발생 수평변위는 그림 4에 나타나 있다. NAVFAC의 주동토압은 Coulomb의 토압론에 근거하여 산정한 토압이며, 벽체지주에서는 벽마찰각을 고려하고 파괴면을 대수나선 형으로 가정한 반면, 가상배면에서의 토압은 벽마찰각을 고려하지 않고 파괴면을 직선으로 가정한 토압이다.

벽체지주 부근의 수평주동토압은 옹벽의 구

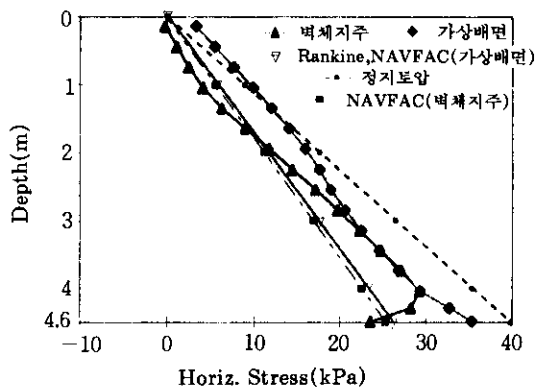


그림 3. 벽체지주와 가상배면에서의 수평주동토압

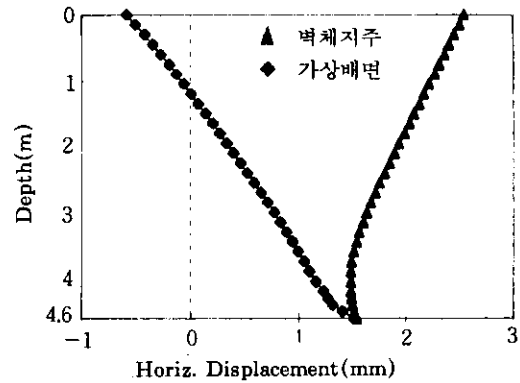


그림 4. 벽체지주와 가상배면에서의 수평변위

조설계에 사용되고, 가상배면의 수평주동토압은 전도와 활동에 대한 안전율을 구하는데 사용된다.

그림 3을 보면, 벽체지주에 작용하는 유효요소해석에 의한 수평주동토압이 상부에서는 Rankine과 NAVFAC의 주동토압과 비슷하지만, 중하부에서는 크게 나타나 전체적으로 토압이 Rankine과 NAVFAC의 주동토압보다 크게 작용하고 있음을 보여주고 있다. 이는 정성교(1995), Tsagrelis(1965), 그리고 Coyle과 Bartoskewitz(1974, 1976)가 행한 현장실험에서 측정된 결과와 Goh(1993)가 행한 수치해석의 결과에서도 옹벽에 작용하는 수평주동토압은 Rankine 또는 Coulomb의 주동토압보다 크게 발생한다는 것과 일치한다. 이러한 결과는 그림 4에서 볼 수 있듯이 수평주동토압과 함께 유발되는 수평변위량을 검토함으로써 설명할 수 있다. 그림 4에 나타난 벽체지주에서의 수평변위량은 깊이에 따라 감소하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 옹벽 상부에서는 Rankine의 주동상태에 필요한 충분한 변위가 발생하였지만, 옹벽 중하부에서는 변위가 작기때문에 Rankine의 주동상태와 K_0 상태사이의 수평주동토압을 갖게된 것으로 판단된다. 또한 벽체지주에 작용하는 토압은 옹벽저부 부근에서 옹벽저면과 흙사이의 마찰저항때문에 감소하는 것으로 나타났다.

가상배면에서의 수평주동토압은 그림 4에서 볼 수 있듯이 옹벽의 움직임에 따른 흙의 수평 변위량이 벽체지주보다 작게 나타나기 때문에 Rankine의 주동토압보다는 정지토압에 가까운 크기의 수평주동토압을 갖는다. 그리고 깊이에 따른 수평주동토압의 분포를 살펴볼 때 벽체지주와는 다르게 상부에서는 정지토압과 비슷한 크기의 수평주동토압이 발휘되지만 중하부에서는 이보다 작은 수평주동토압이 작용하는데, 이는 그림 4에서 알 수 있듯이 벽체의 수평변위가 상부에서는 작은 변위만이 발생한 반면, 깊이에 따라 증가하기 때문으로 판단된다.

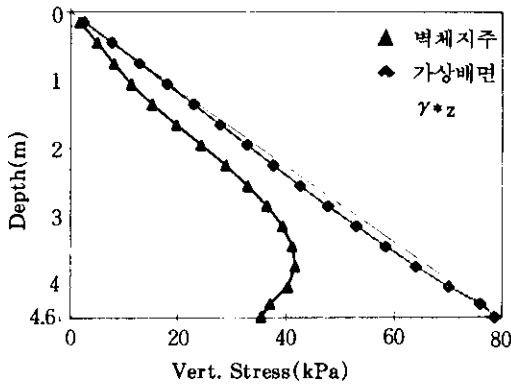
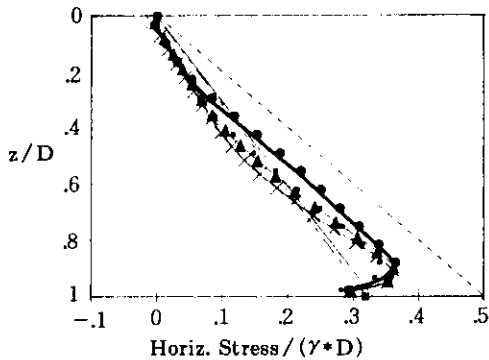


그림 5. 벽체지주와 가상배면에서의 수직토압

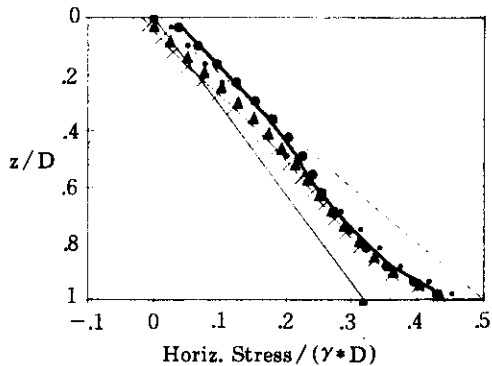
그림 5는 벽체지주와 가상배면에서의 수직토압의 분포를 나타낸 그림이다. 가상배면에서의 수직토압은 $\gamma \cdot z$ 와 거의 비슷하지만, 벽체지주 부근에서의 수직토압은 가상배면에서의 수직토압에 비해 상대적으로 작은 값을 가지며 특히, 벽체지주에서의 수직토압의 경우 깊이에 따라 토압이 증가하지만 하부에서는 그 크기가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 옹벽과 흙사이의 아칭효과에 의해서 발생하는 것으로 판단되는데, 흙과 구조물 사이의 상호작용(interaction)을 보다 심도 깊게 연구함으로써 이러한 결과에 대하여 보다 정확한 해석을 할 수 있을 것이다.

그림 6은 단면형상을 여러가지로 바꾸었을 경우, 벽체지주와 가상배면에서의 수평주동토압의 분포를 Rankine과 NAVFAC의 주동토압과 정지토압, 그리고 기본조건(그림 1)과 비교하여 나타낸 그림이다.

그림을 통해 알 수 있듯이 전체적인 분포는 벽체지주와 가상배면에서 모두 거의 비슷하게 나타나지만, 옹벽의 높이가 높아질수록 약간씩 작은 수평주동토압분포를 나타낸다. 그리고 앞부리폭이 길수록 수평주동토압이 크게 발생한



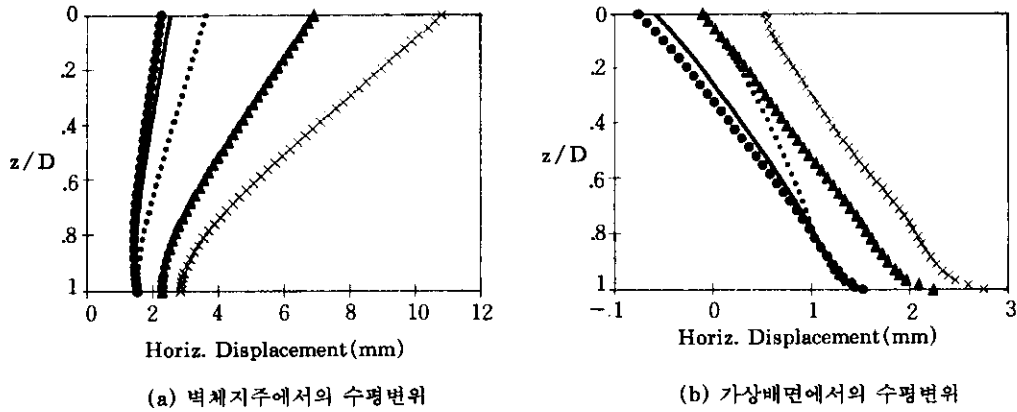
(a) 벽체지주에서의 수평주동토압



(b) 가상배면에서의 수평주동토압

- 옹벽의 높이 5m, 앞부리폭 0.9m
- ▲ 옹벽의 높이 5.9m
- × 옹벽의 높이 6.5m
- NAVFAC
- 앞부리폭 0.3m
- 앞부리폭 1.2m
- Rankine
- 정지토압

그림 6. 옹벽단면 변화에 따른 벽체지주와 가상배면에서의 수평토압



(a) 벽체지주에서의 수평변위
 (b) 가상배면에서의 수평변위

— 옹벽의 높이 5m, 앞부리폭 0.9m -·- 앞부리폭 0.3m
 -▲- 옹벽의 높이 5.9m -●- 앞부리폭 1.2m
 -×- 옹벽의 높이 6.5m

그림 7. 옹벽단면 변화에 따른 벽체지주와 가상배면에서의 수평변위

다는 사실을 알 수 있다.

그림 7은 벽체지주와 가상배면에서의 수평 변위의 분포를 각 경우에 따라 기본조건과 비교하여 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 옹벽의 높이가 높아질 경우, 그리고 앞부리 폭이 작을 경우, 기본조건보다 큰 수평변위의 분포를 보이는 것으로 보아 수평주동토압의 분포가 그만큼 작게 나타난다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 작용수평주동토압은 발생변위와 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있다.

3.2 뒤채움흙이 경사진 경우의 작용토압

그림 8~11은 뒤채움흙이 5°, 10°, 15°, 17°로 경사진 경우, 벽체지주와 가상배면에서의 수평 주동토압의 분포를 Rankine과 NAVFAC의 주동토압, 그리고 정지토압과 비교하여 나타낸 그림이다. 여기서 경사진 지반의 정지토압은 Danish Code(Danish Geotechnical Institute, US Army Corps of Engineers(1994)에 수록)에서 제안한 식 1의 정지토압계수($K_{0\phi}$)를 이용하여 구하였다. 그리고 Rankine의 주동토압식은 식 2, 3에 나타나있다.(Das, 1984)

$$K_{0\phi} = (1 - \sin\phi)(1 + \sin\beta) \quad (1)$$

여기서,

ϕ : 흙의 내부마찰각

β : 뒤채움흙의 경사각

$$P_s = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \quad (2)$$

$$\text{여기서, } K_a = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi}} \quad (3)$$

H : 옹벽저부의 하단점에서부터 뒤채움흙의 상단점까지의 거리

해석결과에 따른 수평주동토압분포를 나타낸 그림 8~그림 11을 살펴보면, 앞서 설명한 뒤채움흙이 수평인 경우와 마찬가지로 유한요소 해석에 의한 수평주동토압은 가상배면과 벽체지주 두 조건 모두 Rankine이나 NAVFAC의 주동토압보다 크게 나타나며, 특히 뒤채움의 경사각이 커질수록 그 차이가 커져서 경사각이 15°이상인 경우에는 정지토압과 유사한 크기의 수평주동토압을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 뒤채움 경사각에 상관없이 깊이에 따른 수평주동토압크기의 변화가 뒤채움흙이 수평인 경우와 비슷한 경향을 보이며, 또한 벽체지주와 가상

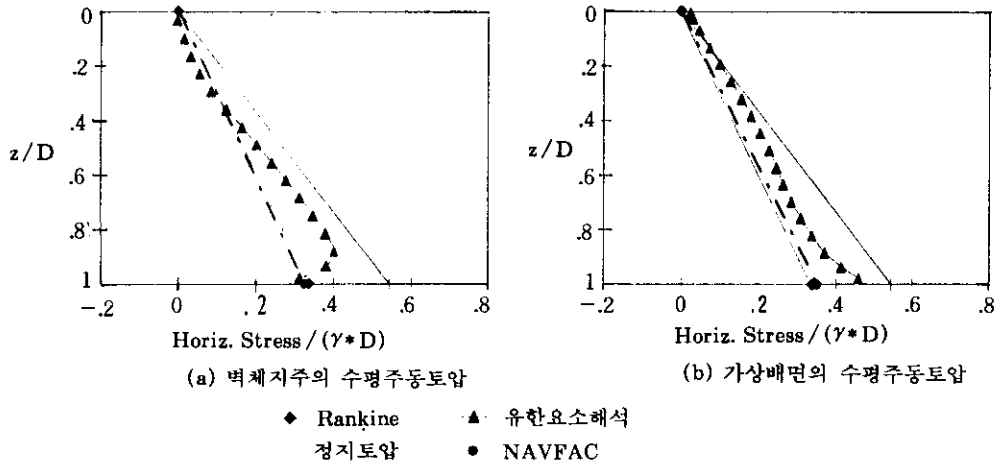


그림 8. 뒤채움흙의 경사각이 5°인 경우

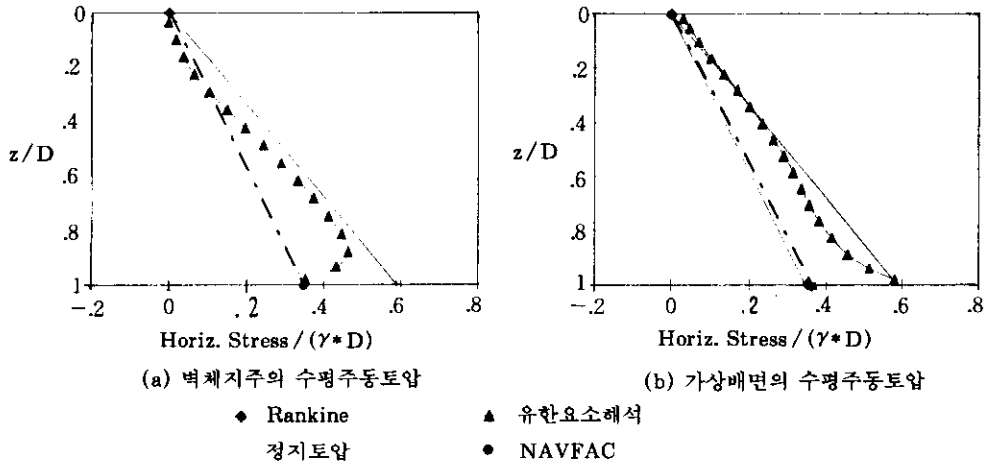


그림 9. 뒤채움흙의 경사각이 10°인 경우

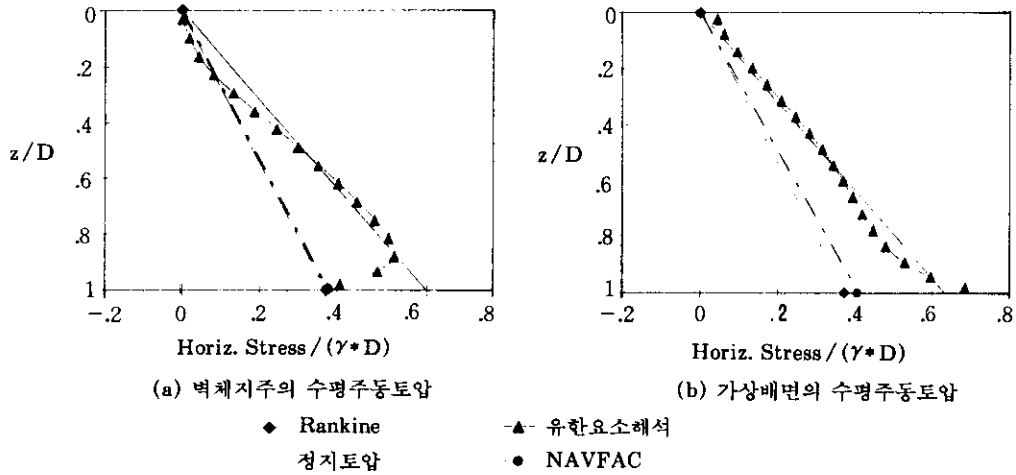


그림 10. 뒤채움흙의 경사각이 15°인 경우

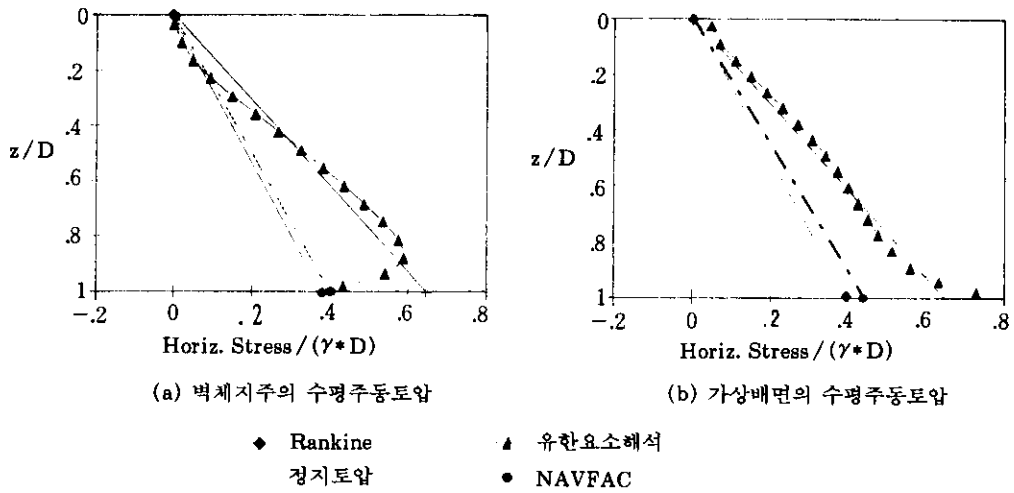


그림 11. 뒤채움흙의 경사각이 17°인 경우

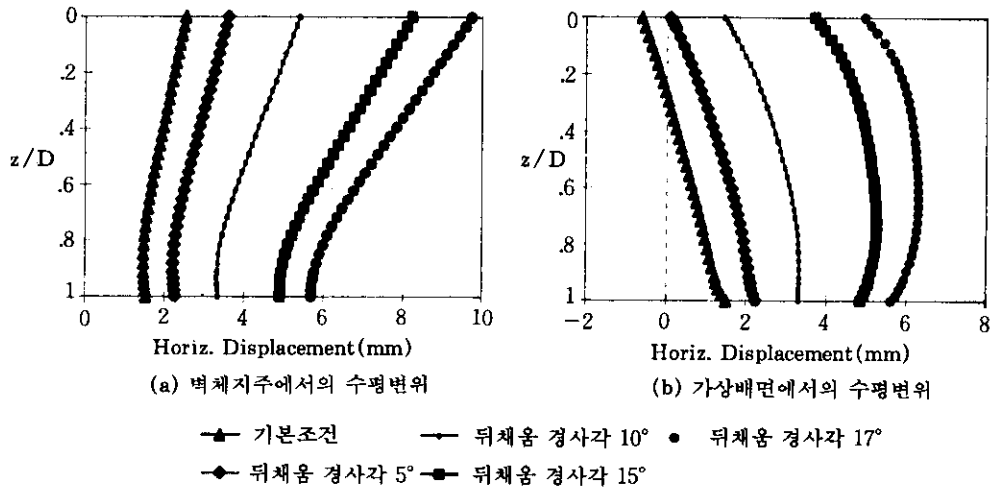


그림 12. 뒤채움 흙이 경사진 경우, 벽체지주와 가상배면에서의 수평변위

배면에서의 수평변위를 나타낸 그림 12에서 알 수 있듯이 깊이에 따른 수평변위의 변화양상도 유사하다. 따라서 앞서 설명한 옹벽의 작용수평주동토압이 발생변위와 밀접한 관계가 있다는 사실을 확인할 수 있다. 다만 경사각의 증가에 따라 수평변위량이 전체 깊이에 대하여 증가하는데, 이는 전체 벽체에 작용하는 수평주동토압의 증가에 따른 결과이다.

표 2에 가상배면에 대한 전체작용력의 크기

와 작용점의 위치, 그리고 작용경사각을 각 방법에 대하여 나타내었다. 여기서 작용점의 위치는 가상배면에 대하여 옹벽저부 하단점에서부터 뒤채움흙의 상단점까지 거리(H)에 대한 옹벽저부 하단점으로부터의 높이(z)의 비(z/H)로, 작용경사각은 전체작용력의 수평면에 대한 기울기(δ)로 표시하였다. 앞서 설명한 작용수평주동토압의 크기에서 알 수 있듯이 유한요소해석결과를 기준으로 할 때 Rankine이나

표 2. 가상배면에서 전체 작용력의 크기(P_s) 및 그 방향

기호	크기	Rankine	NAVFAC	유한요소해석		
		크기(kPa)	크기(kPa)	크기(kPa)	위치(z/H)	경사각
기본조건		68.09	74.12	92.32	0.359	0
뒤채움높이 5° 경사질 경우		74.24	83.23	113.78	0.345	15.33
뒤채움높이 10° 경사질 경우		83.10	100.31	142.19	0.344	18.60
뒤채움높이 15° 경사질 경우		95.48	116.39	182.29	0.340	22.56
뒤채움높이 17° 경사질 경우		102.14	125.36	201.13	0.340	23.40

NAVFAC의 방법은 전체 작용력을 각각 26%~49%, 20%~38%정도 과소평가하며, 뒤채움의 경사각이 커질수록 과소평가의 정도가 증가한다. 가상배면에서의 작용점의 위치는 일반적으로 제시되는 옹벽 높이의 1/3보다 약간 높은 0.34~0.36이고, 뒤채움의 경사각이 증가할수록 낮게 위치한다. 그리고 작용경사각의 크기는 Rankine의 방법에서 사용되는 뒤채움의 경사각보다 유한요소해석에 의한 해석결과가 6°~10° 정도 크게 나타난다.

3.3 옹벽의 안전에 관한 검토

표1과 그림1과 같은 조건의 옹벽의 다양한 뒤채움의 경사각에 따른 활동(sliding), 전도(overturning)에 대한 안전율과 편심의 크기를 본 연구에서 행한 유한요소해석에 의한 수평주동토압과 NAVFAC의 주동토압을 토대로 산정·비교하여 표3에 나타내었다.

앞서 설명한 것처럼 기존의 해석방법이 수평주동토압을 과소평가하기 때문에 전도와 활동에 대한 안전율이 유한요소해석에 의한 결과보다 크게 산정됨을 알 수 있다. 따라서 현재 사용되고 있는 Rankine이나 NAVFAC의 방법에 따라 옹벽을 설계할 경우 안전율을 실제보다 과다하게 평가하는 위험한 설계가 될 가능성이 있다. 다만 편심의 크기는 표3에 나타난 바와 같이 두 방법이 비슷한 결과를 보여주고 있다.

3.4 토압산정식의 제안

유한요소해석에 의한 수평주동토압분포를 근거로 하여 간편한 수평주동토압 산정방법을 제시하기 위하여 뒤채움이 수평인 경우에서 다양한 옹벽 단면에 대한 벽체지주와 가상배면에 대한 수평주동토압분포를 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 본 연구에서는 이 수평주동토압분

표 3. 전도와 활동에 대한 안전율과 편심의 위치

기호	안전율		활동(sliding)		편심의 위치(m)*	
	NAVFAC	유한요소해석	NAVFAC	유한요소해석	NAVFAC	유한요소해석
기본조건	4.65	3.44	2.40	1.31	0.028	0.068
뒤채움높이 5° 경사	2.87	2.28	2.01	1.26	0.081	0.080
뒤채움높이 10° 경사	2.84	2.12	1.94	1.14	0.110	0.104
뒤채움높이 15° 경사	2.84	2.00	1.90	1.03	0.142	0.139
뒤채움높이 17° 경사	2.85	1.93	1.89	0.98	0.157	0.158

*) 옹벽저부의 중심에서 전면측에 위치

포의 상한값을 토대로 간편하게 수평주동토압을 산정할 수 있도록 하였다.

벽체지주에서의 수평주동토압은 그림 13과 같이 옹벽 상부에서 0.33D까지는 Rankine의 주동토압과 일치하지만, 그 이상의 깊이에서 0.9D의 깊이까지는 $(K_a+3K_0)/4$ 선을 따르고, 그 이후에는 선형적으로 감소하여 옹벽 하부에서 주동상태에 이르는 분포를 갖는다.

가상배면에서의 수평주동토압은 그림 14와 같이 뒤채움 상부에서 깊이 0.4D까지는 정지토압의 상태에 있으며, 그 이상의 깊이에서 0.9D까지는 $(K_a+K_0)/2$ 선을 따르고, 그 이후에는 $(K_a+3K_0)/4$ 선을 따르는 분포를 갖는다.

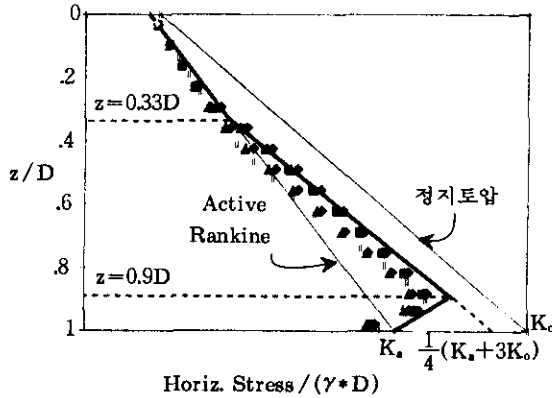


그림 13. 벽체지주에서, 수평주동토압의 간편식

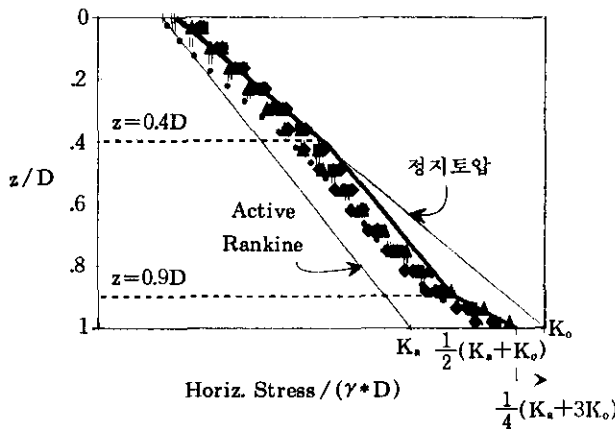


그림 14. 가상배면에서, 수평주동토압의 간편식

4. 결론 및 연구방향

본 연구에서는 캔틸레버식 옹벽의 거동을 Drucker-Prager의 지반구성모델을 이용한 유한요소해석을 통하여 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 캔틸레버식 옹벽의 벽체지주와 가상배면에 작용하는 수평주동토압의 크기는 발생 수평변위량과 밀접한 관계가 있으며, 흙의 주동과피상태를 기준으로 산정된 Rankine의 주동토압과 NAVFAC에 의한 주동토압은 전체작용력을 기준으로 할 때 각각 26%, 20% 정도로 작용토압을 과소평가하고, 뒤채움의 경사각이 증가할수록 과소평가의 정도가 증가한다.
2. 가상배면에서의 전체작용력의 작용점은 옹벽높이의 1/3보다 큰 0.34~0.36에 위치하며, 작용경사각의 크기도 뒤채움의 기울기보다 6°~15°정도 크다.
3. 유한요소해석 결과를 토대로 하여 경사지 않은 뒤채움을 갖는 캔틸레버식 옹벽의 벽체지주와 가상배면에 작용하는 수평주동토압을 산정할 수 있는 간편한 방법을 제시하였다.
4. 본 연구는 가정된 옹벽 단면과 지반조건에 대하여 유한요소법으로 해석한 결과이므로, 이의 검증은 위해서는 모형시험이나, 현장시험이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 정성교, 이만렬, 정진교(1995), "역 T형 옹벽에 뒤채움 다짐으로 유발된 횡토압의 현장계측", *한국지반공회지*, 11권 2호, pp. 5~17.
2. Clough, G. W., and Duncan, J. M.(1971), "Finite element analyses of retaining wall behavior." *Journal of Soil Mech Found., ASC, F*, 97(12), pp. 1657~1673.
3. Coyle, H. M., et al.(1974), "Field Measurements of Lateral Earth Pressures on a Cantilever Retaining Wall," *Transportation*

- Research Record*, No. 517, Transportation Research Board, Jan., pp. 16~29.
4. Colye, H.M., and Bartoskewitz, R.E.(1976), "Earth Pressure on Precast Panel Retaining Wall", *Journal of Geot. Eng. ASCE*, 102 (GT5), pp. 441~456.
 5. Das, B.M.(1984), *Principles of Foundation Engineering*, Wadsworth Inc, Belmont, California, 731p.
 6. Drucker, D. C., and Prager, W.(1952), "Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design", *Quart Appl. Math*, Vol. 10, No.2, pp. 157~165.
 7. Goh, A.T.C.(1993), "Behavior of Cantilever Retaining Walls." *Journal. of Geot. Eng. ASCE*, 119(11), pp. 1751~1770.
 8. Hibbit, Kalsson, and Sorensen(1993), *ABAQUS manual (Version 5.2)*, Hibbit, Kalsson & Sorensen, Inc.
 9. NAVFAC Design Manual DM-7.2(1982), *Foundation and Earth Structures*, Department of the Navy, Naval Facilities Engineering. Comm., Alexandria, Va.
 10. Tsagrelis, X.N.(1965), "Experimental investigation of the pressure of a loose medium on retaining wall with a vertical backface and horizontal backfill surface", *Soil mechanics (USSR)*, No. 4, pp. 1~3.
 11. US Army Corps of Engineers(1994), *Retaining and Flood walls*, Technical Engineering and Design Guides as Adapted from the US Army Corps of Engineers, No.4 ASCE, New York, 313p.

(접수일자 1996. 3. 4)