

## 토사지반에 설치된 역 T형 옹벽의 저판형상이 활동거동에 미치는 영향

### Effects of Base Shape of Cantilever Retaining Wall in Soil Foundation on the Sliding Behavior

유 남 재\*      이 명 옥\*\*      김 영 길\*\*      이 종 호\*\*\*  
Yoo, Nam-Jae    Lee, Myung-Woog    Kim, Young-Gil    Lee, Jong-Ho

#### Abstract

This thesis is to investigate the sliding behavior of cantilever retaining wall by using the commercially available program of FLAC to simulate its behavior numerically. Cantilever retaining walls with flat base, sloped base and base with shear key, uniform surcharges being applied on the surface of backfill, were investigated to figure out appropriate location of shear key beneath the base of wall and, thus, its applicability to field condition was assessed by comparing the analyzed results to each other.

On the other hand, previously performed centrifuge model test results (Eum, 1996) were analyzed numerically with FLAC to compare test results with respect to characteristics of load-settlement of surcharges and load-lateral movement of wall. Based on the failure mechanism observed during centrifuge tests, limit equilibrium method of finding the ultimate load inducing the sliding failure of wall was used to compare with values of the ultimate load obtained from conventional method of limit equilibrium method. Therefore, appropriate location of shear key was determined to mobilize the maximum resistance against sliding failure of wall.

Keywords : Centrifuge model, Sloped base, Shear key, Equilibrium method, FLAC

#### 1. 서 론

옹벽은 자연 구배를 이룰 수 없는 배면의 흙을 지지하고, 그의 붕괴를 방지하는 흙막이 벽으로 교량, 도로, 흙제방, 주택단지 등에 많이 사용되고 있는 대표적인 토류구조물이다. 옹벽의 안정성 검토는 활동, 전도, 지지력에 대하여 각각의 안전율을 반영하여 이와 같은 기준을 설계에 반영하고 있다. 대부분의 옹벽은 연약지반에 위치할 경우 지지력에 관한 대두되며 이와 안정성문제가 같은 상황을 제외

하고는 전도 및 지지력에 대하여는 소정의 안전율을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다. 옹벽의 활동 파괴에 대한 보강 대책으로는 기초 저판폭을 확대하거나 기초 저판을 경사지게 하는 경우가 있으나 가장 일반적으로 사용하는 방법은 전단키를 설치하는 경우이다.

저판폭의 과도한 확장과 저판이 경사지게 시공하는 경우는 경제성이 문제가 되고 그 효과도 의문시되고 있다. 한편, 전단키를 설치하는 옹벽은 기초지반이 단단한 경우에 최대의 효과를 구현할 수 있지만 시공시 지반 굴착에 따른 교란정도, 성토에 따른 지반의 다짐 정도, 하부 지반의 다짐정도 등에 따라 활동을 억제하는 효과가 각각 차이를 보인다. 이러한 문제에 대한 해결 방안으로는 저판을 경사지게 설치하는 방법이 있으며 이 경우는 추가

\* 강원대학교 토목공학과 부교수 공학박사

\*\* 강원대학교 토목공학과, 공학박사

\*\*\* 강원대학교 토목공학과 박사수료

비용이 많이 드는 단점이 있지만 옹벽 저판이 경사짐에 따라 활동을 억제시키는 효과를 고려할 수 있으며, 성토재와 콘크리트 사이에 작용하는 마찰계수가 작은 경우와 전단키의 시공굴착 깊이가 제한되는 조건에서 효과적인 것으로 알려져 있다.

따라서, 본 연구에서는 상재하중하 역 T형 옹벽의 활동거동에 관한 원심모형실험(엄재경, 1996)에서 얻어진 옹벽의 저판형상과 전단키의 위치변화에 따른 1g 및 원심모형실험 결과를 바탕으로 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교분석을 실시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 주문진 표준사의 기본물성

본 연구에서 기초지반 및 뒷채움으로 사용된 공기 건조시킨 주문진 표준사의 물리적 특성은 <표 1>과 같으며, 입경가적곡선은 그림 1과 같다.

<표 1> 주문진 표준사의 기본적인 물성

Grain Size Distribution	$D_{10} = 0.21 \text{ mm}$ $C_u = 1.19$ $C_c = 1.01$
Maximum Dry Density	1.682 $\text{kg/cm}^3$
Minimum Dry Density	1.384 $\text{kg/cm}^3$
Maximum Void Ratio	0.879
Minimum Void Ratio	0.546
Specific Gravity	2.6

한편, 모형실험에서 사용된 상대밀도 80%의 모형지반조성시 균질한 초기 상대밀도를 갖는 지반을 형성하기 위하여 강사장치를 제작 강사법을 이용하여 초기에 균질한 지반을 형성하였다.

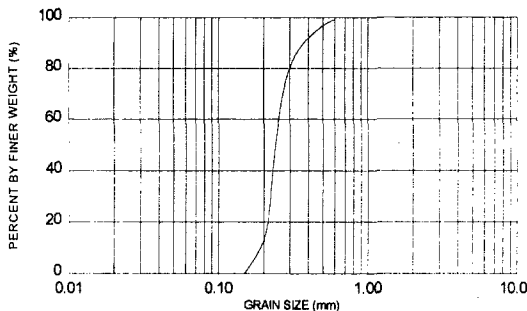


그림 3 주문진 표준사의 입경가적곡선

### 2.2 주문진 표준사의 전단강도 특성

이론적인 극한지지력 산정 및 수치해석을 위한 전

단강도 정수 및 그에 따른 응력-변형 구성관계 (Constitutive Relationship)를 구하기 위해 모형실험과 동일한 조건에서의 삼축압축시험 및 콘크리트의 옹벽 및 알루미늄 모형토조와 기초지반 및 뒷채움재로 사용된 주문진 표준사 사이의 마찰저항력을 구하기 위해 마찰저항시험이 수행되었다.

본 연구에서는 사면의 원심모델링(이명욱, 1998)에서 수행된 구속응력 수준을 고려한 전단강도특성 시험값을 이용하여 해석을 수행하였다. 압밀배수(CD test)조건의 삼축압축 결과 상대밀도 80%에 대한 실험결과는 <표 2>와 같으며 전단강도 정수인 내부마찰각  $\phi$ 와 점착력  $c$ 는 그림 2에 보인 바와 같이 Mohr의 및 응력경로를 이용하였으며, 모형실험에 있어 중력수준을 변화시키기에 따라 모형지반내의 평균 유효응력이 변화하는 것을 고려하여 그림 3에 나타난 바와같이 중력수준에 따른 내부마찰각 변화를 적용하였다.

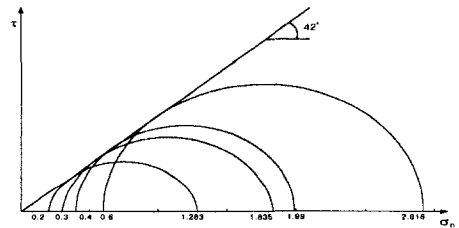


그림 4 모어원 (Dr=80%)

<표 2> 삼축압축 시험결과

RD (%)	Confining Pressure ( $\text{kg/cm}^2$ )				Slope of Failure Line in p-q Space $\tan \alpha$	Frictional Angle in $\sigma$ - $\tau$ Space $\phi$	c
	Deviator Stress at Failure $\sigma_1 - \sigma_3$ ( $\text{kg/cm}^2$ )						
	0.2	0.3	0.4	0.6			
	80	1.083	1.535	1.590	2.316	0.699	42.00

한편, 상대밀도 80%의 주문진 표준사로 형성된 기초지반과 콘크리트 및 알루미늄 토조사이의 경계면에서의 마찰저항력을 구하기 위해 마찰저항시험을 실시하였다. 마찰시험결과는 <표 3>과 같으며 기초지반과 콘크리트 옹벽사이의 경계면에서 발생하는 마찰각은 사면의 원심모델링(이명욱, 1998)에 의하면 구속응력 수준에 따라 비선형적 거동을 한다고 판단되어 기초지반과 콘크리트 옹벽사이의 마찰각을 1g 및 20g의 응력수준에 따라 마찰시험결과를 토대로 다음과 같이 산정하여 <표 4>에 나타 내었다. 한편, 그림 4

는 구속응력에 따른 마찰각의 변화를 상관관계식으로 나타내고 있다.

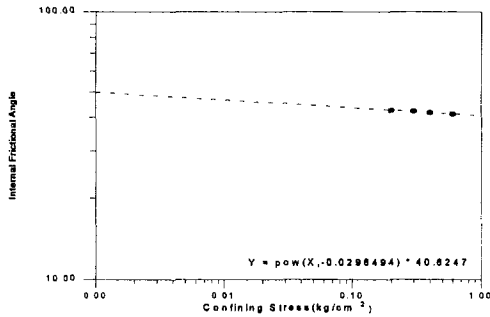


그림 5 구속응력변화에 따른 내부마찰각의 변화

<표 3> 마찰시험 결과

Frictional Test								
Material	Dr (%)	Peak Strength(kg/cm <sup>2</sup> )					Friction Coeff. f	Friction Angle (°)
		Normal Stress(kg/cm <sup>2</sup> )						
AL	80	0.064	0.078	0.122	0.162	0.202	0.203	11.48
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0		
Con	80	0.08	0.13	0.205	0.275	0.35	0.4458	24.0
		0.1	0.15	0.2	0.4	0.6		

AL; 알루미늄, Con; 콘크리트

<표 4> 구속응력수준을 고려하여 산정된 마찰각

Material		Aluminum	Concrete
G-level	1 g		
	20 g	11.48 °	27 °

$\delta_r$ , 기초지반 및 뒷채움재와 인접사면과의 경계면에서의 마찰각

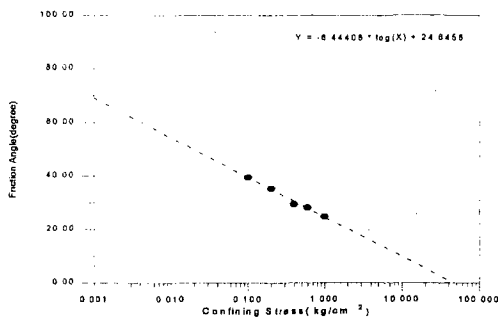


그림 6 구속응력 수준에 따른 마찰각의 상관관계

### 2.3 원심모형실험 내역

본 연구에서는 캔틸레버 옹벽의 저판의 형상과 중력수준을 변화시켜 이들의 영향에 대한 옹벽의 활동거동을 알아보기 위하여 중력수준 1g 상태 및 20 g 중력상태하에서 상재하중 재하실험을 실시 하였다.

<표 5>는 본 연구에서 기수행된 실험종류를 나타내고 있다.

#### (1) 모형제작

그림 5 는 본 연구에 이용된 옹벽의 기초가 평편한 경우, 전단키가 설치된 경우, 저판이 경사진 경우의 역 T형 캔틸레버 옹벽의 단면제원으로서 높이 16.5 cm, 저판길이 9 cm, 두께 2 cm의 콘크리트 모형 옹벽으로 제작하였으며, 전단키의 크기는 1.7 cm × 1.7 cm 로 제작하였으며 저판의 경사는 그림 6 에 보인 바와 같이 경사를 8 °와 15 °가 되게 제작하였다.

한편, 본 실험에 사용된 옹벽중 기초가 평편한 옹벽에 대한 안전율은 활동( $F_s=4.34$ ), 전도( $F_s=5.92$ ) 값이 산정되어 본 단면이 옹벽의 활동거동을 알아보기에 적합하다고 판단되어 결정하였다.

한편, 아래의 단면은 20 g의 원심모형실험의 경우 현상에서의 3.3 m 옹벽에 해당된다.

<표 5> 1 g 및 20 g 상재하중 재하시험 종류

Wall Type	Wall footing type	Dr (%)	Slope of footing (°)	Width of Footing (cm)	G - Level		Inclination of Backfill (°)
T Wall	Flat	80	0	10	1	20	0
	Toe	80	0	10	1	20	0
	Middle	80	0	10	1	20	0
	Heel	80	0	10	1	20	0
	Bottom slope	80	8	10	1	20	0
	Bottom slope	80	15	10	1	20	0

이 연구에 사용된 토조는 그림 6에 보인 바와 같이 (폭×길이×높이=20×45×70) 크기의 직사각형 토조로써 측면과 저면은 고강도 알루미늄으로 제작하였으며 전면은 Plexiglass로 제작하여 실험과정을 육안으로 확인 가능하도록 하였으며 실험시 수평 연직변위는 LVDT로 하중은 Load Cell을 사용하여 계측하였다.

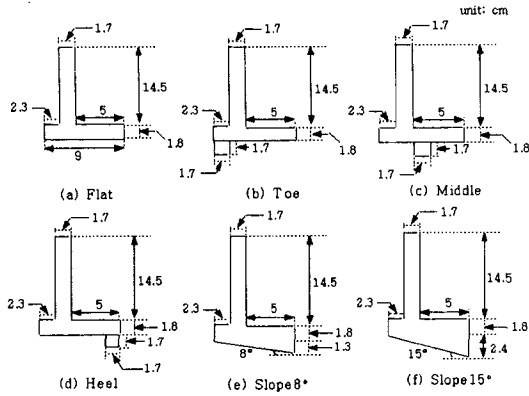


그림 7 각각의 응벽에 대한 단면제원

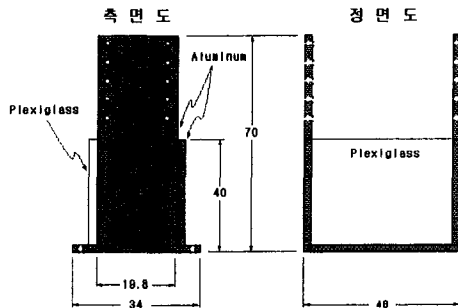


그림 8 모형토조의 단면제원

### 3. 극한평형해석

본 절에서는 캔틸레버 응벽의 활동거동에 대한 저 판형상과 전단키의 영향(유남재, 이명욱의 2인,1999)에서 1g 모형실험과 20g 원심모형실험에서 모형응벽에 상재하중을 재하시 응벽의 배면에서 형성된 파괴면을 기준으로 한 췌기해석과 2:1 응력분포법을 응용하여 극한하중을 구하는 과정을 서술이 되어있으므로 본 절에서는 파괴면의 형상과 극한하중 산정식만 간단하게 기술하였다.

#### 3.1 1g모형실험

1g 모형실험결과 그림 8 에 관찰된 파괴메카니즘 으로부터 산정된 극한 하중식은 아래의 식 1 과 같다.

$$q_s B = 2 P_1 \cos(90 - \phi - \theta_1) - W_1 \quad (1)$$

여기서,  $q_s$  = 상재하중강도,  
 $B$  = 상재하중의 재하폭,  
 $W_1$  = Block 3에 보인 상재하중에 의해 형성된 주동영역의 췌기무게.

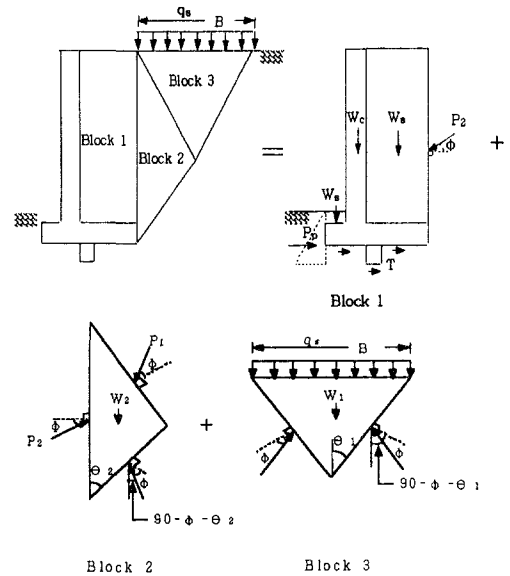


그림 10 응벽에 작용하는 힘의 평형 관계 (1g)

### 3.2 원심모형실험

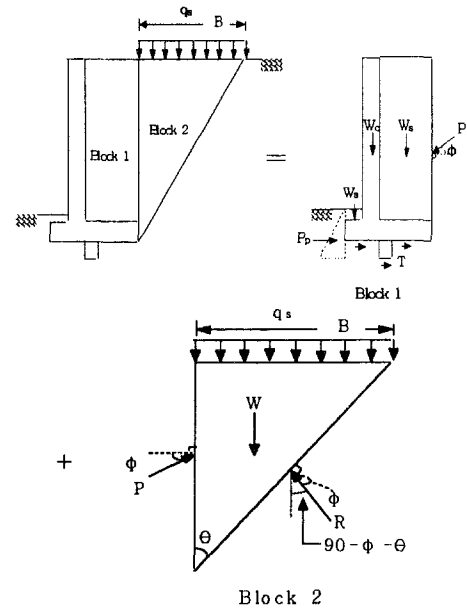


그림 9 응벽에 작용하는 힘의 평형 관계 (20g)

원심모형실험과 나타난 그림 9에 파괴메카니즘을 통해 산정된 극한하중 산정식은 아래의 식 2 과 같다.

$$q_s B = \frac{W \cdot A + P b}{(\cos \phi - \sin \phi \cdot A)} \frac{\cos \phi}{\tan(90 - \phi - \theta)} + \frac{W \cdot A + P b}{(\cos \phi - \sin \phi \cdot A)} \sin \phi - W \quad (2)$$

여기서,  $W$  = block 2의 췌기무게,

$W_i$  = 옹벽무게 + 옹벽 저판상부에 위치한  
뒷채움흙무게

$$A = (Y \tan \delta + Z \tan \phi) / 9.$$

### 3.3 2:1 응력분포법의 응용

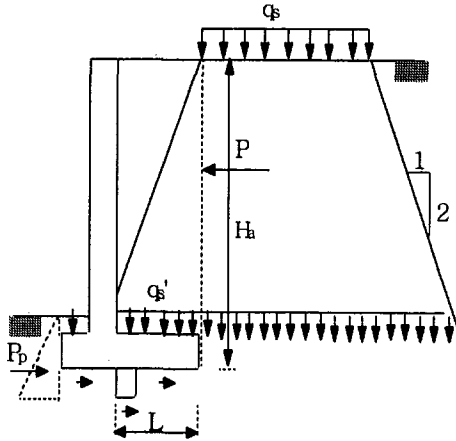


그림 10 2:1 응력분포법에 의한 힘의 평형관계

그림 10에 나타난 2:1 응력분포를 응용하여 산정된 극한 하중 산정식은 다음과 같다.

$$q_s = \frac{(W_i + P_a \sin \phi)(Y \tan \delta + Z \tan \phi) + 9(P_p - P_a \cos \phi)}{\frac{9R H_a}{180}(\theta_2 - \theta_1) - 0.444L(Y \tan \delta + Z \tan \phi)} \quad (3)$$

여기서,  $L$  = 2:1 응력분포법에 의해 하중이 걸리는 옹벽저판의 뒷굽길이,

$H_a$  = 주동토압의 높이.

$$N = W_i + P_a \sin \phi,$$

$W_i$  = 옹벽무게 + 옹벽 저판상부에 위치한  
뒷채움 흙무게,

$L$  = 연직력으로 작용하는  $q_s'$  가 옹벽저  
판상부에 작용하는길이.

$$\tan \delta = (Y \tan \delta + Z \tan \phi) / 9$$

## 4. 수치 해석

### 4.1 FLAC을 이용한 수치해석

#### (1) 해석방법

본 연구에서 수행된 수치해석에서는 지반의 거동에 관하여 범용적으로 사용되고 있는 평면변형상태하

의 이차원 거동분석이 가능한 상용프로그램인 FLAC를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 기초지반 및 뒷채움재의 응력 - 변형의 구성관계는 쌍곡선함수로 표현하는 비선형 탄성모델인 쌍곡선모델(Hyperbolic Model)을 사용하였으며 콘크리트 옹벽은 강성의 매질을 갖는 강성체로 탄성적인 요소로 모델링 하였다.

#### (2) 경계요소

본 수치해석에서는 옹벽의 기초지반 및 뒷채움재와 접촉하는 콘크리트옹벽의 경계면에 경계요소(Interface Element)를 두어 이들 경계면에서 작용하는 마찰력에 의해 유발되는 마찰저항력도 고려하여 해석을 실시하였다.

아래의 그림 11은 본 수치해석에서 적용한 기법에 대한 설명이다. 두 접촉면(A, B) 사이의 경계요소는 <Figure 4.3>과 같이 마찰력, 점착력, 인장강도, 연직강성 및 전단강성의 성질을 갖는다.

여기서, 전단저항력,  $S = cL + \tan \phi F_n$ 의 Mohr - Coulomb 전단강도식을 따르며,  $c$ 는 접촉면 사이의 점착력,  $\phi$ 는 접촉면 사이의 마찰각,  $L$ 은 접촉면의 길이,  $F_n$ 은 접촉면 사이의 연직력을 나타낸다.

아래의 식 4와 5는 본 수치해석에서 마찰면에 적용된 연직강성( $K_n$ )과 전단강성을( $K_s$ )를 산정하는 식이다.

$$K_n = \frac{Bulk + \frac{4}{3} Shear}{\Delta z_{min}} * 10 \quad (4)$$

$$K_s = \frac{Bulk + \frac{4}{3} Shear}{\Delta z_{min}} * 10 \quad (5)$$

$$\text{여기서, } Bulk = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

$$Shear = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

$\nu$  : 포아송 계수,

$E$  : 지반의 탄성계수 (Kpa),

$\Delta z_{min}$ : 인접지반의 가장 짧은변의 요소의 길이.

### 4.2 상재하중 재하실험 수치해석

수치해석에서 격자요소로 모델링한 단면, 지반과 구조물사이의 경계요소(Interface Element), 경계조건을 그림 12 - 그림 14에 평편한 경우, 전단기가 설치된 경우, 저판이 경사진 경우에 대하여 나타내었다.

본 수치해석에서 사용된 콘크리트옹벽과 모형토조에 대한 물성은 아래의 <Table 4.6>에 나타낸 바와 같다. 한편 본 연구에 사용된 기초지반 및 뒷채움재는 상대밀도 80%의 주문진 표준사로서 지반의 특성은 사면의 원심모델링(이명옥, 1998)에서 보인바와 같이 일련의 삼축압축시험을 통하여 구하였으며 실험결과 산정된 쌍곡선구성모델의 매개변수는 아래의 <Table 4.7>에 나타난 바와 같다.

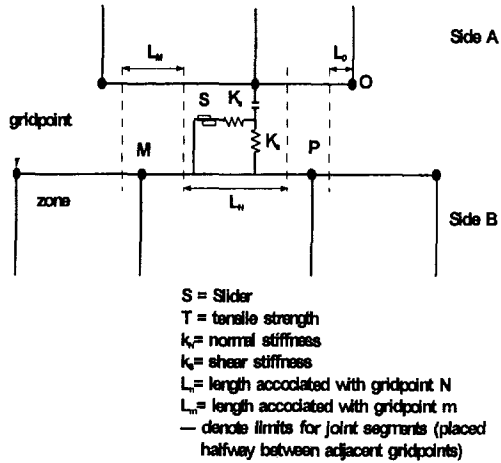


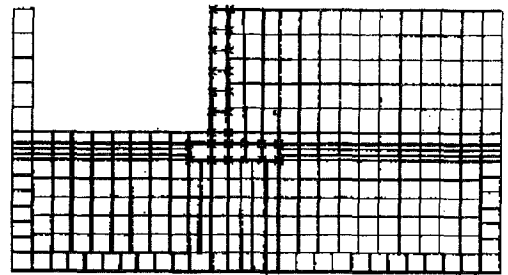
그림 11 A와 B면의 경계면에서 스프링으로 묘사된 전단 및 연직강성

<표 6> 수치해석에 사용된 재료의 물성

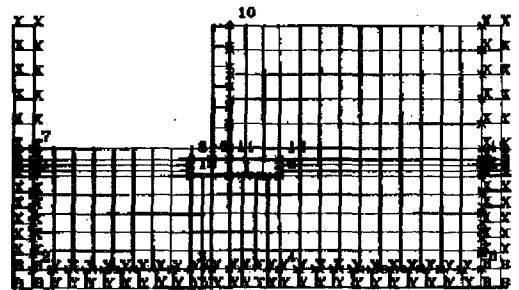
Description	Unit	Concrete	Aluminum
Elastic Modulus	Mpa	30	72
Poisson's Ratio	-	0.17	0.17
Unit Weight	Kn/m <sup>3</sup>	19.60	23.52

<표 7> 상대밀도 80%의 주문진 표준사의 쌍곡선모델 변수

Parameter		Evaluated Value
Mohr - Coulomb Failure	$c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0
	$\phi$ (°)	42
Stress - Strain	K	1181
	n	0.722
	Rf	0.95
	Kur	2383.7
Axial Strain - Volumetric Strain	E - B	
	Kb	656
	m	0.889

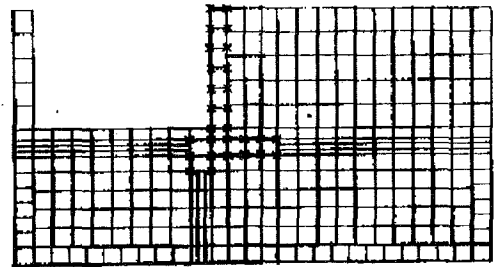


(a) 단면의 형태



(b) 경계조건 및 구축조건

그림 12 평평한 저판 (Flat Base)



(a) 단면의 형태

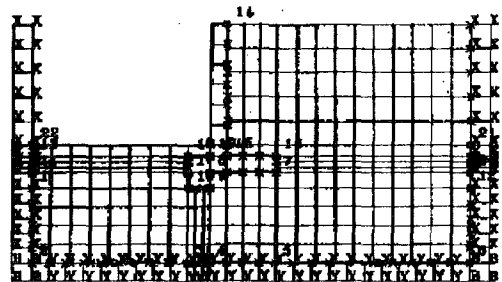
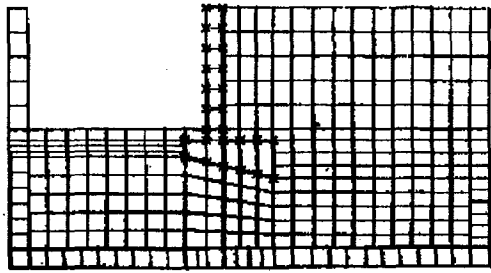
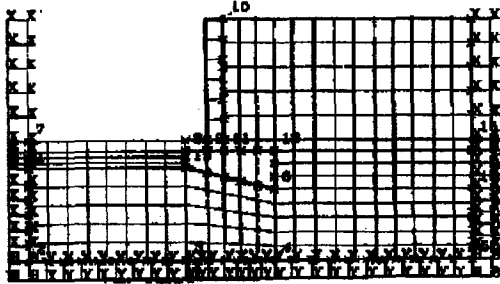


그림 13 전단기가 앞쪽에 위치한 옹벽 (Toe Base)



(a) 단면의 형제



(b) 경계조건 및 구속조건

그림 14 저판이 경사진 옹벽 (Sloped Base, 15°)

## 5. 결과 및 분석

### 5.1 하중-침하특성

옹벽의 기초가 평평한 경우와 전단키의 위치를 변화시키고 기초의 저면이 경사진 옹벽에 대하여 1g 상재하중 재하실험 결과와 FLAC을 이용한 수치해석결과를 비교분석하여 그림 15 - 그림 19의 결과를 얻었다. 한편 수치해석에서는 평균내부마찰각  $\phi = 43.09^\circ$  와 평균마찰각  $\delta = 35^\circ$  를 사용해 수행된 결과를 실선으로, 구속응력수준을 고려한 내부마찰각  $\phi = 46.17^\circ$  와 마찰각  $\delta = 41.6^\circ$  를 사용해 해석한 결과를 점선으로 표시하여 나타내었다. 1g 모형실험결과 하중침하곡선은 상대밀도가 조밀한 사질토지반에서 보여주는 전반전단파괴 모드의 대표적인 특성인 극한값을 지나 한계상태에 이르기까지 점진적으로 극한 지지력이 감소하는 변형률연화를 보이고 있는 반면에 수치해석결과는 하중침하곡선이 극한값을 지나 계속해서 단조증가하는 변형률경화 현상을 보이는데 이는 본 연구에 기초지반 및 뒷채움지반에

응력변형의 구성관계를 쌍곡선함수로 표현하는 비선형 탄성모델을 사용하였으므로 이 쌍곡선함수 모델의 특성상 파괴이후의 변형률연화 현상을 묘사할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

1g 모형시험결과 전단키가 가운데 위치한 그림 17의 경우가 가장 큰 극한 하중값을 전단키가 없는 기초가 평평한 그림 15의 경우가 가장 작은 극한하중값을 보이고 있으며 저판이 경사진  $8^\circ$  인 모형옹벽도 전단키가 없는 경우와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. 한편, 그림 18 과 그림 20은 전단키가 뒷굽에 위치한 경우와 저판이 경사진  $15^\circ$  의 경우로 둘다 유사한 극한하중과 연직침하량을 나타냄을 알 수 있다.

한편, 수치해석결과는 실험결과와 마찬가지로 다른 기초에 비해 기초가 평평한 옹벽과 Slope  $8^\circ$  의 옹벽이 가장 작은 극한 하중값을 나타내고 있으나 전체적으로 그 차이는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 한편, 구속응력 수준을 고려하여 지반의 내부마찰각과 지반과 콘크리트의 마찰각을 적용한 점선으로 표시된 수치해석결과가 실험결과에 근접함을 알 수 있었으며 이는 옹벽을 해석함에 있어 지반의 응력수준을 고려한 물성을 사용하는 것이 타당하다는 것을 보여주고 있다.

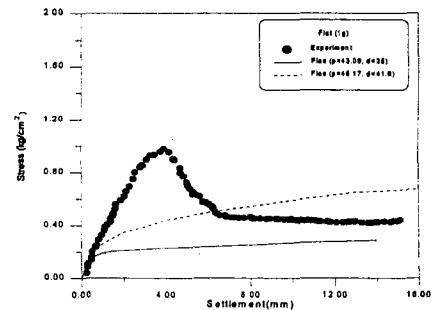


그림 15 1g 하중-침하 곡선(Flat)

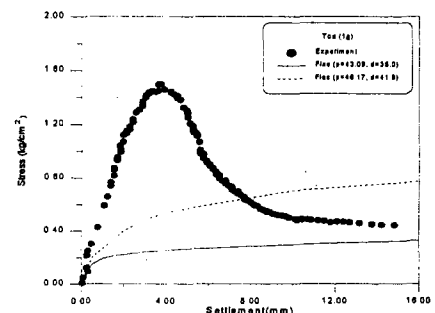


그림 16 1g 하중-침하 곡선(Toe)

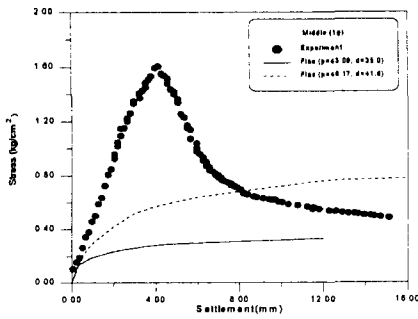


그림 17 1g 하중-침하 곡선(Middle)

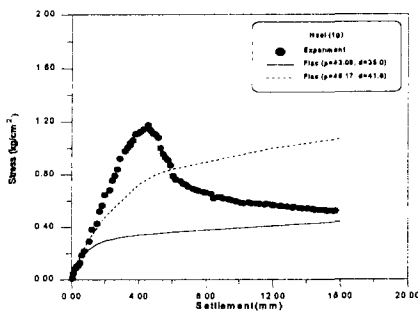


그림 18 1g 하중-침하 곡선(Heel)

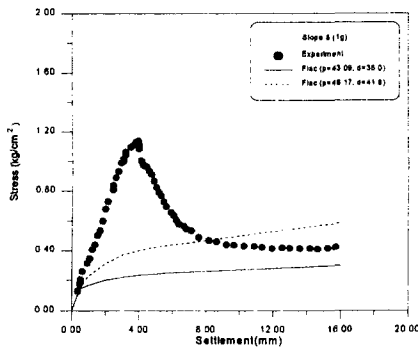


그림 19 1g 하중-침하 곡선(Slope 8 °)

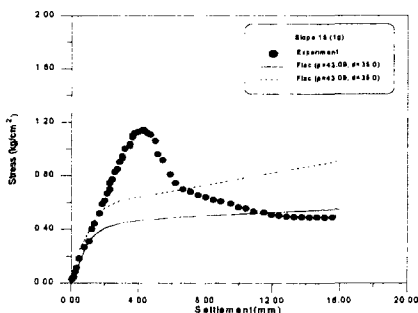


그림 20 1g 하중-침하 곡선(Slope 15 °)

20g 원심모형실험과 FLAC을 사용한 수치해석을 통해 그림 21 - 그림 26의 하중 - 침하 결과를 얻었다. 본 해석에서도 앞서 1g 해석과 마찬가지로 주문진 내부마찰각과 지반과의 마찰각을 평균값과 구속응력 수준을 고려한 값을 사용하여 해석에 나타내었다.

20g 원심모형실험결과 하중침하곡선은 전반전단 파괴 모드의 대표적인 특성을 보이고 있으며 수치해석 결과 또한 하중-침하 곡선이 극한값을 지나 계속해서 단조증가하는 변형률경화 현상을 보이고 있다.

20g의 원심모형 실험결과에서도 전단키가 가운데 위치한 경우 그림 23 이 가장 큰 극한하중을 나타내었고 전단키가 없는 경우와 Slope 8 °의 기초가 가장 작은 극한하중값을 보임을 알 수 있다. 한편, 수치해석결과 역시 전단키가 가운데 위치한 경우의 극한하중값이 가장 큰 극한 하중을 나타내며 전단키가 없는 경우와 Slope 8 ° 기초가 가장 작은 극한하중값을 나타냄을 알 수 있다. 한편, 20g 의 원심모형실험에서도 1g 실험과 마찬가지로 구속응력 수준을 고려하여 지반의 내부마찰각과 지반과 콘크리트의 마찰각을 적용한 점선으로 표시된 수치해석결과가 실험결과에 근접함을 알 수 있었으며 이는 응벽을 해석함에 있어 지반의 응력수준을 고려한 물성을 사용하는 것이 타당하다는 것을 보여주고 있다.

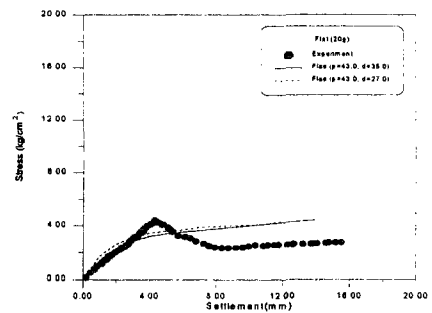


그림 21 20g 하중-침하 곡선(Flat)

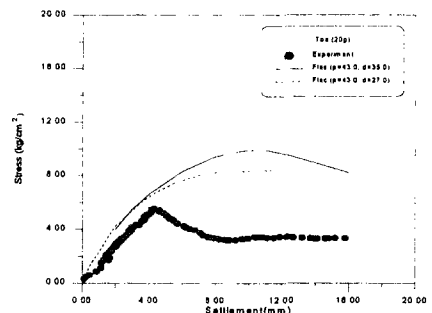


그림 22 20g 하중-침하 곡선(Toe)



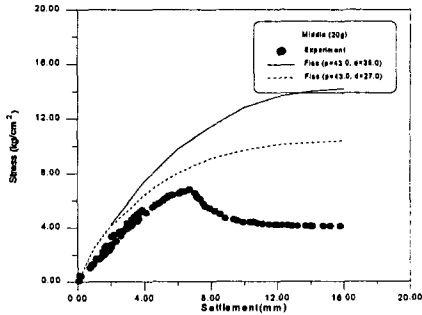


그림 23 20g 하중-침하곡선(Middle)

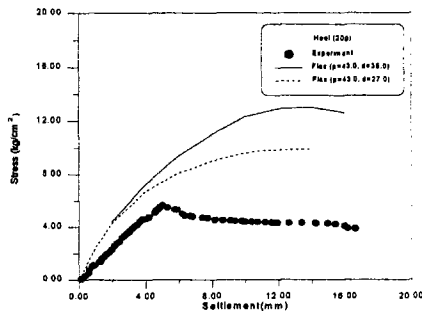


그림 24 20g 하중-침하 곡선(Heel)

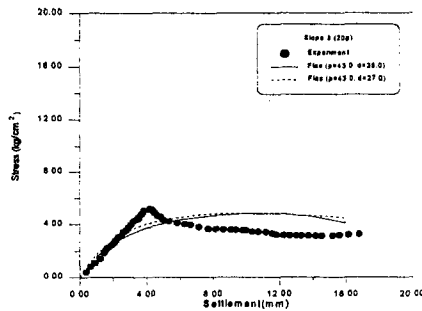


그림 25 20g 하중-침하 곡선(Slope 8°)

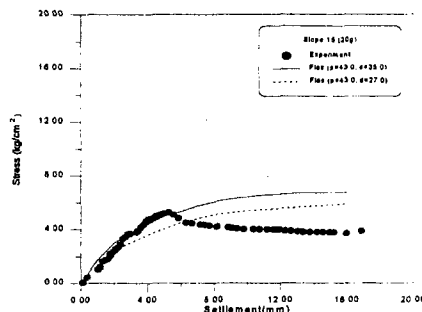


그림 26 20g 하중-침하 곡선(Slope 15°)

## 5.2 극한하중 비교

1g 및 20g 원심모형실험 결과 얻은 모형기초의 극한하중값을 극한평형상태의 썩기해석결과와 Flac을 사용한 수치해석 그리고 2:1 옹벽해석을 사용하여 산정한 값과 비교하여 1g 및 20g로 구별하여 각각 <표 7> - <표 8>과 그림 27 - 그림 28 에 나타내었다.

한편, FLAC 수치해석에서의 극한 하중값은 실험시 극한 하중에 도달하는 연직변위에 대응하는 값을 사용하였다.

1g 모형실험 결과에서는 전단키가 없는 저판의 모형(Flat)보다 전단키가 (Toe)에 설치된 경우에 더 큰 극한하중값을 얻었으며 또한 그것보다 전단키가 (Middle)에 설치된 경우가 더 큰 값이 측정되었다. 한편 전단키가 (Heel)에 설치된 것이 경사저판이 8° 및 15° 인 경우보다 약간 더 큰 수평저항값을 보여주고 있음을 알 수 있으나 전반적으로 뒷굽에 설치한 경우와 경사진 저판을 지닌 옹벽은 거의 유사한 값의 극한하중값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이와같은 실험을 통한 극한하중의 크기는 20g 모형실험에서도 유사하게 관측되었다.

1g 실험결과와 20g 실험결과를 비교하였을 때 동일한 모형 및 재하조건에서 동일한 파괴메카니즘이 발생하고 중력수준에 따라 지반의 물성변화가 없는 경우에는 중력수준의 크기에 비례하여 극한하중값이 증가하는 것이 타당하나 실험결과에서는 그렇지 않음을 알 수 있다.

그러한 이유는 중력수준, 즉 구속응력의 변화에 따라서 파괴메카니즘과 지반의 물성 특히 내부마찰각 및 저판과 지반사이의 마찰력의 비선형적 변화에 기인된 것으로 판단된다.

썩기해석으로 예측한 결과에서는 1g와 20g를 비교할 때 거의 중력수준 크기에 비례하고 있음을 알 수 있다. 그와 같은 경향을 옹벽해석법에서 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

한편, Flac을 사용한 1g 옹벽수준의 수치해석결과는 썩기해석과 마찬가지로 실험값에 비해 극한 하중이 작게 산정되었으며 전단키가 중앙(Middle)나 뒷굽(Heel), 그리고 저판경사가 15°인 경우의 극한하중이 대체로 다른 기초의 형상에 비해 크게 산정되었으며 중력 수준 20g 의 해석결과도 유사한 경향을 보이고 있다.

각 모형에 대하여 실험결과와 썩기해석 및 수치해석에 의한 예측결과를 비교하였을 때 20g인 경우에는 전단키를 중앙과 뒷굽에 설치한 경우를 제외하고는 대체적으로 유사한 범위에서 극한값이 산정되었으나

<표 8> 각각의 해석결과 산정된 극한하중의 비교 (1g)

	실험	췘기해석	Flac	2:1 응력분포	
				20g	
				R=2(강체)	R=1(흙)
FLAT	0.978	0.355	0.4	0.048	0.154
TOE	1.497	0.381	0.5	0.063	0.202
MIDDLE	1.605	0.559	0.60	0.074	0.273
HEEL	1.175	1.045	0.7	0.081	0.331
SLOPE8°	1.138	0.914	0.4	0.051	0.173
SLOPE15°	1.146	0.825	0.6	0.066	0.235

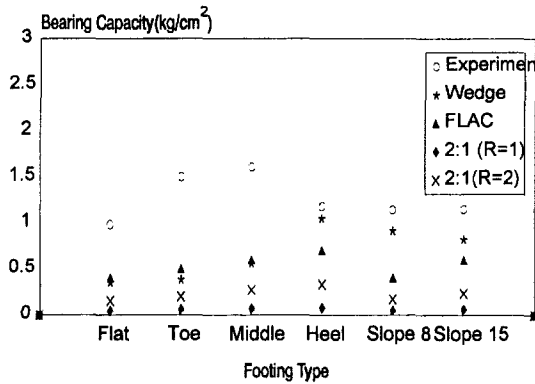


그림 27 극한하중비교 (1g)

<표 9> 각각의 해석결과 산정된 극한하중의 비교 (20g)

	실험	췘기해석	Flac	2:1 응력분포	
				20g	
				R=2(강체)	R=1(흙)
FLAT	4.444	5.321	3.85	0.966	3.088
TOE	5.554	6.941	6.50	1.260	4.029
MIDDLE	6.804	10.771	8.0	1.484	5.457
HEEL	5.471	14.500	6.5	1.621	6.617
SLOPE8°	5.158	5.905	4.0	1.024	3.450
SLOPE15°	5.309	8.375	4.0	1.316	4.706

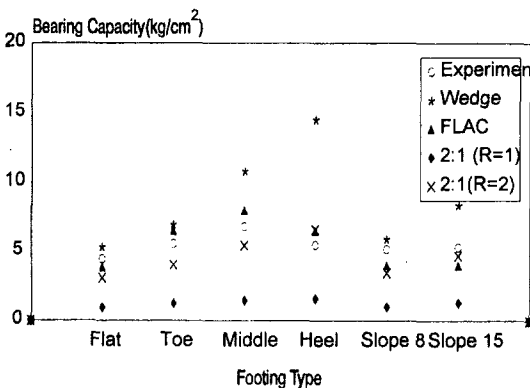


그림 28 극한하중비교 (20g)

1g 실험에서는 예측치가 실험값보다 현저하게 작은 값으로 산정되었음을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 구속응력이 매우 작은 1g 실험에서는 다이러턴시 효과에 의한 지반의 내부마찰각 및 콘크리트 저판 사이의 마찰각이 증가하였기 때문으로 판단된다. 뒷굽에 전단키를 설치한 모형이나 경사진 저판을 지닌 모형실험 결과에서는 유사한 극한하중값이 측정된 반면에 예측치에서는 뒷굽에 전단키를 설치한 경우가 극한하중값이 상당히 크게 평가된 것은 응력전면의 수동저항력을 평가하기 위한 활동선의 범위를 과대하게 추정된 것으로 판단된다. 염색사를 통한 관찰된 활동선은 상당량의 모형기초의 연직변위에 의한 모형응력의 수평변위를 유발시킨 상태에서 측정된 것으로 실제로 모형기초의 극한하중 상태에서는 전단키 전면의 구속된 지반내에서 미세한 수평변위에 따라서 수동 저항력이 발휘되었을 것으로 예상된다. 그와 같은 내용의 설명이 중앙에 전단키를 설치한 경우에도 적용될 것으로 판단된다.

한편, Jarquio(1981)의 응력해석법을 사용한 예측치와 실험결과를 비교한 결과에서도 췘기해석 결과와 마찬가지로 중력수준의 변화에 따른 극한하중값의 변화가 현저함을 알 수 있다. 본 해석에서는 응력체의 뒷채움재를 강체로 가정한 경우(R=2)와 압축성 재료로 가정한 경우(R=1)로 구별하여 분석을 실시한 결과, 중력수준 20g에서 압축성재료로 가정한 산정한 극한하중값이 실험값에 대체적으로 접근하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 뒷채움재의 압축성에 관련된 것으로 판단되며 중력식 응력과 같이 강체의 콘크리트 구체에 작용하는 수평토압산정 시에는 R=2의 값을 적용하여야 한다. 1g 실험결과 얻은 극한값을 응력해석법에 의한 극한값과 비교하여 볼 때 췘기상의 한계 평형해석과 마찬가지로 예측치가 실험치에 비하여 현저하게 적게 평가되었음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 전술에 언급한 바와 같이 낮은 구속응력 하에서 다이러턴시 효과에 의한 내부마찰각 및 저판과 지반 사이의 마찰각의 증가에 따른 저항력의 증가로 판단된다.

결론적으로 실험과 예측결과를 비교분석한 결과, 전단키를 응력저판 중앙에 설치하는 것이 활동과피에 대하여 저항력을 크게 갖을 수 있음을 알 수 있었으며 경사진 저판 응력은 기대한 것보다 그 효율이 크지 않을 가능성이 있음을 확인하였다. 응력해석법이 췘기해석보다 저항력을 낮게 평가하여 보다 안전측의 설계방법으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

또한, 응력의 활동과피를 유발시키는 상재하중의 극

한값의 보다 정확한 예측을 위하여 구속응력 변화에 따른 지반 내부마찰각과 옹벽저판 사이의 마찰각의 변화를 고려한 해석방법에 관한 연구가 필연적으로 수행되어야 함을 알 수 있었다.

### 6. 결 론

이 연구는 사질토 지반에 위치한 옹벽의 저판에 전단기가 없는 경우와 앞굽에 위치한 경우, 가운데 위치한 경우, 뒷굽에 위치한 경우, 저판이 경사진 경우의 임의 단면에 대하여 지반해석 상용프로그램인 FLAC을 사용하여 수치해석을 수행하여 기 수행된 상기의 기초형태에 대한 1g모형실험과 20g 원심모형 상재하중 실험결과에서 획득한 하중-침하특성, 극한하중등을 FLAC을 사용한 수치해석결과와 극한평형해석 및 옹벽해석을 통해 산정된 결과와 비교분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 토사지반에 위치한 역 T형 옹벽의 활동저항력 증진을 위하여 전단기의 설치 및 경사진 저판 사용보다 저판과 기초지반 사이의 마찰증진을 위한 방안 제시가 역학적, 경제적으로 타당성이 있을 것으로 판단된다.
2. 모형실험결과와 췌기해석 및 수치해석에 의한 예측결과를 비교하였을 때, 1g 실험결과치는 20g 실험결과치에 비하여 예측결과가 크게 측정된 것은 낮은 구속응력 상태하에서 다이러턴시 효과에 의한 지반의 내부마찰각 및 콘크리트 저판 사이의 마찰각이 증가하였기 때문으로 판단되며, 이러한 구속응력수준을 고려하여 지반의 내부마찰각과 지반과 콘크리트의 사이에 유발되는 마찰각을 적용시켜 수행된 수치해석결과는 대체로 실험결과에 근접하였다.
3. Jarquio(1981)의 옹벽해석법을 사용한 예측치와 실험결과를 비교한 결과, 췌기해석 결과와 동일하게 중력수준의 변화에 따른 극한하중값의 변화가 현저하였으며 해석조건에 따라 옹벽감소계수값의 적절한 선택이 요구된다.

- [1] 유남재, 이명옥 외 2인, "캔틸레버옹벽의 활동거동에 대한 저판형상과 전단기의 영향", *대한토목학회*, 제 19권, 제III-2호, 1999.
- [2] 엄재경, "상재하중하 역T형 옹벽의 활동거동에 관한 원심모형실험", *강원대학교 공학석사 학위논문*, 1996
- [3] 이명옥, "사면에 인접한 옹벽의 원심모델링", *강원대학교 공학박사 학위논문*, 1998.
- [4] Bassett, R.H. Craig, W.H., & A.N. Schofield, Development of geotechnical centrifuges on the United Kingdom, 1965-1985. *Centrifuge in Soil Mechanics*, Balkema, Rotterdam, 1987.
- [5] Clugh, G. W., and Duncan, J. M., "Finite element analysis of retaining behavior." *J. Soil Mech. and Found. Engrg. Div., ASCE*, 97(12), 1657-1673, 1971.
- [6] Craig, W.H., "Centrifuge modelling for site specific prototypes", *Proc. Symp. Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design*, 1984a.
- [7] Craig, W.H., James, R.G., and A.N. Schofield(Eds.), "Centrifuge in Soil Mechanics", *Balkema*, Rotterdam, 1987.
- [8] Das, B. M., "Principles of Foundation Engineering" , PWS Engineering, 1984.
- [9] Duncan, J. M., and Chang, C. Y. 1970, "Nonlinear analysis of stress and strain in soils." *J. Soil Mech. and Found. Engrg. Div., ASCE*, 96(5), pp 1629-1653, 1970.
- [10] Elman, M. T., Terry, C. F. 1987, "Retaining Walls with Sloped Base", *ASCE*, Vol 113, No9, pp 1049-1054, 1987.
- [11] Horvath, J. S., "Effect of Footing Shape on Behavior of Cantilever Retaining Wall", *ASCE*, Vol 117, No6, pp 973-978, 1991.
- [12] Ramon Jarquio., "Total Lateral Surcharge Pressure Due to Strip Load", *ASCE* , Vol 107, No10, pp 1424-1428, 1981.
- [13] Yoo, N. J., "Centrifugal Model Experiments of Reinforced Earth Retaining Walls". Ph. D. Thesis, *University of Coloardo at Boulder, Colorado*. 1988.

### 참 고 문 헌