

공학석사 학위논문

$c-\phi$ 흙으로 뒷채움한 중력식
옹벽의 동적토압

지도교수 정 두 회

이 논문을 학위논문으로 제출함



2002년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

박 태 환

박 태 환의 공학석사 학위논문을 인준함

2001년 12월 26일

주 심 공학박사 정 진 호 (인)

위 원 공학박사 이 환 우 (인)

위 원 공학박사 정 두 회 (인)

차 례

차례	v
그림 차례	vii
표 차례	ix
Abstract	x
 1. 서론	 1
1.1 연구의 필요성 및 목적	1
1.2 연구동향	1
1.3 연구 범위 및 내용	2
 2. 동적도압에 대한 기존의 연구	 3
2.1 Mononobe-Okabe 이론	3
2.2 Prakash-Saran 이론	7
2.3 Seed-Whitman 이론	11
2.4 정성교·백승훈 이론	13
 3. 준정적 토압이론식	 18
3.1 $c-\phi$ 흙에 대한 토압이론식의 유도	18
3.1.1 준정적 해석법에 의한 이론식	18
3.2 토압계수의 결정	29
3.3 한계각의 결정	32
3.3.1 Mononobe-Okabe 방법	32
3.3.2 본 연구에서의 제안방법	35

차 례(계속)

4. 기존의 이론 결과와의 비교	41
4.1 동적주동토압 분포	41
4.2 전동적주동토압계수	42
4.3 동적주동토압의 작용점위치	42
4.4 상·하향 연직지진가속도계수에 대한 영향	43
4.5 점착력에 대한 영향	43
5. 동적토압의 영향인자 분석	50
5.1 동적주동토압분포	50
5.2 전동적주동토압	51
5.3 작용점 위치	52
6. 결론	64
참고문헌	65

그 림 차 례

그림 2.1 Mononobe-Okabe에 의한 흠뻑기(after Mononobe, 1929; Okabe, 1926)	6
그림 2.2 동하중이 작용하고 $c-\phi$ 흠으로 뒷채움된 옹벽에 작용하는 힘(after Prakash and Saran, 1966)	8
그림 2.3 동적수평토압의 결정에 대한 경험법칙(after Seed and Whitman, 1970)	12
그림 2.4 파괴뻑기 내의 미소평면요소에 작용하는 힘(정성교와 백승훈, 1992)	15
그림 2.5 흠과 벽체의 경계면에 대한 Mohr의 응력(정성교와 백승훈, 1992)	17
그림 3.1 파괴뻑기내의 미소평면요소에 작용하는 힘	19
그림 3.2 흠과 벽체의 경계면에 대한 Mohr 응력원	31
그림 3.3 지진하중이 작용하는 경우 가상의 파괴뻑기에 작용하는 힘	40
그림 4.1 기존이론과 수정 이론식의 동적주동토압분포($K_{ae}(z)$)	45
그림 4.2 기존이론과 수정 이론식의 전동적주동토압(K_{AE})	46
그림 4.3 기존이론과 수정 이론식의 작용점위치($\bar{h}$)	46
그림 4.4 상·하 k_v 에 의한 동적토압분포	47
그림 4.5 상·하 k_v 에 의한 전동적주동토압	48
그림 4.6 상·하 k_v 에 의한 작용점의 위치	48
그림 4.7 점착력의 영향에 따른 동적주동토압분포	50
그림 5.1 벽체배면의 경사각의 변화에 따른 동적주동토압분포	54
그림 5.2 뒤채움 성토면의 경사각의 변화에 따른 동적주동토압분포	55
그림 5.3 내부마찰각의 변화에 따른 동적주동토압분포	56
그림 5.4 벽면의 마찰각의 변화에 따른 동적주동토압분포	57
그림 5.5 수평지진가속도계수의 변화에 따른 동적주동토압분포	58

그 립 차 례(계속)

그림 5.6	연직지진가속도계수의 변화에 따른 동적주동토폰분포	59
그림 5.7	α 의 변화에 따른 전동적주동토폰	60
그림 5.8	β 의 변화에 따른 전동적주동토폰	60
그림 5.9	ϕ 의 변화에 따른 전동적주동토폰	61
그림 5.10	δ 의 변화에 따른 전동적주동토폰	61
그림 5.11	α 의 변화에 따른 작용점위치	62
그림 5.12	β 의 변화에 따른 작용점 위치	62
그림 5.13	ϕ 의 변화에 따른 작용점 위치	63
그림 5.14	δ 의 변화에 따른 작용점위치	63

표 차 례

표 2.1 흙쌓기 abcd에 작용하는 힘의 성분	9
표 2.2 Mononobe-Okabe와 Seed-Whitman 이론에 의한 계산값의 비교	13
표 2.3 기존이론의 비교	18
표 3.1 Mohr 응력원 에서의 응력	30
표 4.1 기존이론 및 수정 Mononobe-Okabe 이론식에 의한 전동적 주동토압(K_{AE}) 비교	44
표 4.2 기존이론 및 수정 Mononobe-Okabe 이론식에 의한 작용점의 위치($\bar{h}$) 비교	44

Dynamic Analysis of Earth Pressure on Gravity Retaining Wall
Backfilled with $c - \phi$ Soil

Tae-Hwan Park

*Department of Civil Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

Although Mononobe-Okabe's theory has been widely used in the seismic design of retaining wall subjected to earthquake loads, it does not provide a distribution of earth pressure. It does only provide the resultant earth pressure. In addition, the location of the resultant force is assumed to locate at a distance of $H/3$ from the bottom of the wall in Mononobe-Okabe's theory. Therefore, it tends to underestimate the dynamic earth pressure acting on the wall.

The modified Mononobe-Okabe's theory is derived by using the concept of arching and soil wedge. The modified Mononobe-Okabe's theory can consider the effect of vertical acceleration, $c - \phi$ soil, wall inclination, and backfill slope. Based on the results of evaluation by using the modified Mononobe-Okabe's theory, the distribution of dynamic earth pressure is not linear and the location of the resultant earth pressure is higher than $H/3$ from the bottom of the wall. Upward vertical acceleration tends to increase the magnitude of the earth pressure and to raise the location of the resultant earth pressure.

Key words : Gravity retaining wall, earthquake-induced vertical acceleration, soil wedge, plate arching, total thrust

1. 서론

1.1 연구의 필요성 및 목적

자립식 구조형식인 옹벽구조물은 지진 발생시 지진하중에 의한 토압의 증가로 옹벽이 파괴되는 피해가 많이 일어난다. 따라서 지진이 발생할 때 옹벽의 붕괴를 방지하기 위해서는 옹벽구조물에 작용하는 동적토압을 정확히 예측하는 것이 무엇보다 중요하다.

옹벽구조물에 적용할 수 있는 동적토압 이론은 1926년 Okabe, 1929년 Mononobe등 다수의 학자들에 의하여 발표되었다. 이들 중 Mononobe와 Okabe 이론이 실무에 가장 널리 사용되고 있지만 이 이론에 의해서는 단지 전동적토압만 구할 수 있고 옹벽설계에 중요한 요소인 작용점 위치를 $H/3$ 로 가정하므로 동적토압을 과소평가하고 있다. 이는 동적토압의 연직방향 관성력을 충분히 반영하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 1995년 일본의 고베 지진에서는 일반적으로 옹벽을 설계할 때 무시하는 연직지진가속도에 의한 피해가 크게 발생하였다.

따라서 본 연구에서는 실제 지진의 진동특성(k_h, k_v)을 고려하여 $c-\phi$ 흙에 적용이 가능하도록 흙쇄기와 평면아치개념을 도입시킨 이론식을 연구하고, 그 결과를 기존의 이론식과 비교·분석하였다.

1.2 연구동향

옹벽구조물에 작용하는 지진의 영향을 고려하기 위한 기존의 연구는 이론적 연구로 Okabe와 Mononobe가 최초로 비점성토에 대하여 Coulomb의 흙쇄기 이론을 수정한 동적토압 이론을 발표하였다.

Prakash-Saran(1966, 1968)은 Mononobe-Okabe 이론을 확장하여 $c-\phi$ 흙에

적용이 가능한 동적토압 이론식을 유도하였으며, Seed-Whitman(1970)은 Mononobe-Okabe이론을 수정하여 옹벽배면의 경사각이 연직이며 뒷채움이 수평인 경우에 대하여 간편한 해석법을 제안하였다. Mononobe와 Okabe 이론과 Prakash와 Saran 이론에서는 전동적토압의 작용점 위치가 $H/3$ 에 있다고 가정하였지만, Seed-Whitman은 동적주동토압의 작용점 위치를 정적주동토압에 대한 작용점 위치($H/3$)에 동적주동토압 증분에 대한 작용점 위치($0.6H$)를 고려했다.

정성교·백승훈(1992)은 흙썰기와 평면아취개념에 의하여 옹벽배면이 경사지며 뒷채움면이 수평일 때 비점성토에 적용할 수 있는 동적토압 이론식을 제안하였다.

1.3 연구 범위 및 내용

본 연구에서는 강성옹벽의 배면이 경사지며 $c-\phi$ 흙으로 뒷채움된 지표면이 경사진 일반적인 경우에 지진 시에 유발되는 동적토압을 구하는 해석법을 제안하고자 한다. 이 해석은 극한평형상태에 있는 흙썰기와 평면아취개념을 도입하여 준정적 해석법으로 유도하고, 또한 점착력이 고려된 인장균열에 대한 해석을 추가하였다.

본 연구에서 유도한 동적토압 이론식의 검증을 위하여 기존의 이론들에 의한 계산결과와 비교·고찰하고자 한다.

2. 동적토압에 대한 기존의 연구

2.1 Mononobe-Okabe 이론

옹벽에 작용하는 동적토압을 산출하는 방법을 최초로 발표한 Mononobe-Okabe 이론은 Coulomb의 주동토압계수를 지진에 의해 발생한 연직 및 수평 방향의 가속도를 고려할 수 있도록 수정한 이론으로써 비점성토에 적용할 수 있으며, 다음과 같은 사항들을 가정하고 있다.

- (1) 벽체의 변위는 최소주동토압을 유발시키는 즉, 뒷채움흙이 소성평형상태에 도달하는데 충분하다고 가정한다.
- (2) 흙의 파괴면은 그림 2.1과 같이 평면파괴면이라 가정한다.
- (3) 최소주동토압이 발생하였을 때 벽체배면의 흙썰기는 최초의 파괴점에 있고 최대전단강도는 파괴면을 따라서 유발된다.
- (4) 흙썰기는 강성체로 거동하고 흙썰기 내의 연직가속도 및 수평가속도는 각각 균등하다.
- (5) 정적토압의 작용점 위치는 벽체의 저면에서 $H/3$ 지점에 위치한다.
- (6) 벽체 자체의 관성 영향은 무시한다.

Mononobe와 Okabe는 지진시 옹벽에 적용하는 동적토압(주동 및 수동토압)을 식(2.1)과 같이 나타내었다.

$$P_E = \left\{ \begin{array}{c} P_{AE} \\ P_{PE} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} K_{AE} \\ K_{PE} \end{array} \right\} (1 - k_v) \frac{\gamma H^2}{2} \quad (2.1)$$

여기서,

$$\left\{ \begin{array}{c} K_{AE} \\ K_{PE} \end{array} \right\} = \frac{\sin^2(\alpha \pm \phi - \psi)}{\sin^2 \alpha \cos \phi \sin(\alpha \pm \delta + \phi) \left[1 \pm \sqrt{\frac{\sin(\phi \mp \delta) \sin(\phi - \psi - \beta)}{\sin(\alpha \mp \delta + \phi) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (2.2)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1 - k_v} \right) \quad (2.3)$$

P_E : 동적토압	β : 뒷채움 성토면의 경사각
P_{AE} : 동적주동토압	δ : 벽면의 마찰각
P_{PE} : 동적수동토압	ϕ : 흙의 내부마찰각
K_{AE} : 동적주동토압계수	k_h : 수평지진가속도계수 ($= \alpha_h/g$)
K_{PE} : 동적수동토압계수	k_v : 연직지진가속도계수 ($= \alpha_v/g$)
γ : 흙의 단위중량	g : 중력가속도
H : 벽체의 높이	α_h : 수평지진가속도
α : 벽체배면의 경사각	α_v : 연직지진가속도

식 (2.2)의 동적주동토압계수(K_{AE})에서 $\sin(\phi - \psi - \beta)$ 는 다음과 같은 중요한 의미를 가진다. 먼저 $\phi - \psi - \beta < 0$ 이면 K_{AE} 의 실수해는 존재하지 않는다. 이의 물리적 의미는 평형상태가 존재하지 않음을 의미한다. 따라서 사면안정의 관점에서 볼 때 뒷채움 재료의 한계경사는 다음과 같은 조건을 가진다.

$$\beta \leq \phi - \psi \quad (2.4)$$

지진이 없을 경우 $\psi = 0$ 이므로 식 (2.4)는 식 (2.5)로 표현된다.

$$\beta \leq \phi \quad (2.5)$$

그리고 $\beta = 0$ 인 경우, 사면안정의 관점에서 보면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\psi \leq \phi \quad (2.6)$$

이 조건을 만족하는 수평지진가속도계수 k_h 는 식(2.3)과 식(2.6)을 연립하여 풀면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$k_h \leq (1 - k_v) \tan \phi \quad (2.7)$$

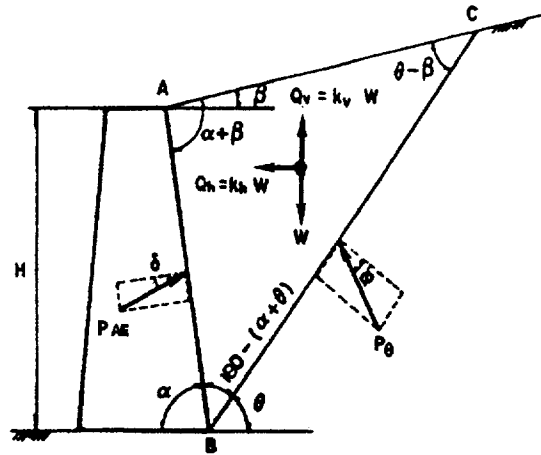
따라서, 수평지진가속도계수의 한계값은 식(2.8)과 같이 표현할 수 있다.

$$k_{h(cr)} = (1 - k_v) \tan \phi \quad (2.8)$$

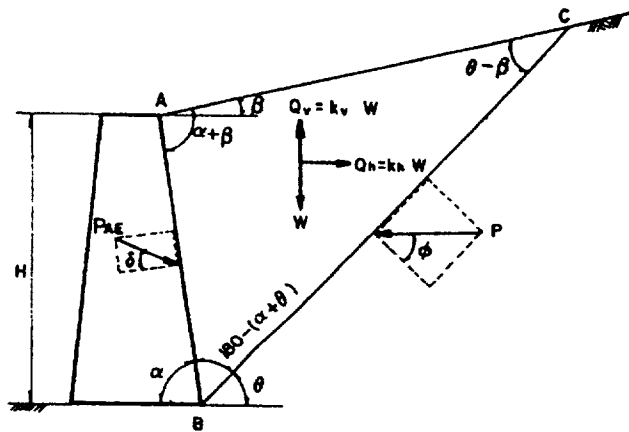
여기서, $k_{h(cr)}$: 수평지진가속도계수의 한계값

k_v : 연직가속도계수

Housner(1974)는 대부분 지진의 경우 연직지진가속도계수 $k_v \simeq (1/2 \sim 1/3)k_h$ 라고 하지만 이 가속도에 대한 영향이 미소하여 연직지진가속도에 대한 영향을 무시하고있다.



(a) 주동상태



(b) 수동상태

그림 2.1 Mononobe-Okabe에 의한 흩세기
(after Mononobe, 1929; Okabe, 1926)

2.2 Prakash-Saran 이론

Mononobe-Okabe 이론은 비점성토에 대해서만 적용할 수 있지만 Prakash-Saran과 Saran-Prakash는 $c-\phi$ 흙에 대한 전 정·동적토압을 구할 수 있는 일반해를 발표하였다.

그림 2.2에서 ab면은 흙과 접촉하고 있는 벽체 배면으로부터 α 만큼 경사져 있다. 뒷채움 경사면은 수평이고 균등한 상재하중 q 가 작용한다. 그림 2.2에서 가정한 파괴면은 b점에서 연직으로 θ 만큼 경사져 있으며, 인장균열의 깊이 (H_c)는 지표면으로부터 깊이방향으로 식(2.9)와 같이 정의하였다.

$$H_c - n(H_1 - H_c) = nH \quad (2.9)$$

여기서, H_1 : 옹벽의 높이

H : 인장균열을 제외한 옹벽의 높이

수평관성력만 고려할 때, 흙쌓기 abcd에 작용하는 모든 힘들은 표 2.1에 제시한 바와 같으며 연직 및 수평성분을 요약하여 정리하면 식(2.10), (2.11)과 같이 주어진다.

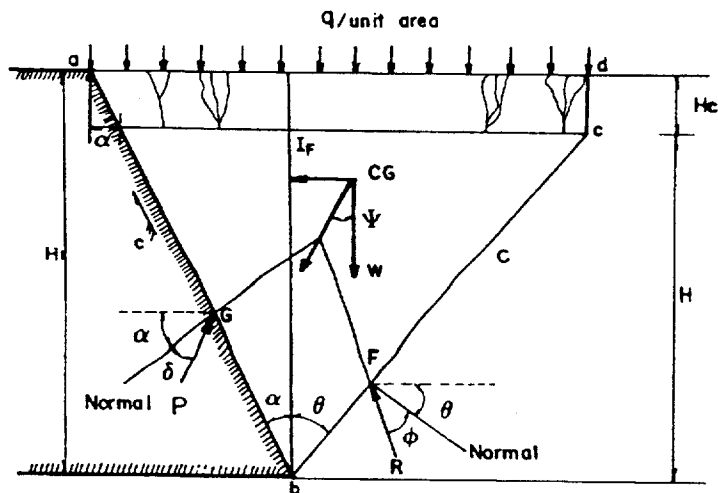
$$\begin{aligned} & (\gamma H^2)(\tan \alpha + \tan \theta) + n \gamma H^2(\tan \alpha + \tan \theta) + n^2(\gamma H^2/2)\tan \alpha \\ & - cH - c'H + qH(\tan \alpha + \tan \theta + n \tan \alpha) = P \sin(\alpha + \delta) + F \sin(\theta + \phi) \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$- cH \tan \theta + c'H \tan \alpha + (W + Q) \alpha_n = P \cos(\theta + \phi) - F \cos(\theta + \phi) \quad (2.11)$$

식(2.10)과 식(2.11)에서 $c' = c$, $\delta = \phi$ 로 가정하고, 표 2.1에서 열거한 W 및

$$\begin{aligned} P_{\text{AE(dyn)}} = & \frac{\gamma H^2}{\sin(\gamma + \delta)} \{ (n + 1/2) (\tan \alpha + \tan \theta) + n^2 \tan \alpha \} \{ \cos(\theta + \phi) + \alpha_h \sin(\theta + \phi) \} \\ & - \frac{cH}{\sin(\gamma + \delta)} \{ \cos \gamma \sec \alpha + \cos \phi \sec \theta \} \\ & + \frac{qH}{\sin(\gamma + \delta)} \{ (n + 1) \tan \alpha + \tan \theta \} \{ \cos(\theta + \phi) + \alpha_h \sin(\theta + \phi) \} \end{aligned} \quad (2.12)$$

식(2.12)는 응벽에 유발된 부착력 c' 와 벽면마찰각 δ 가 각각 점착력 c 와 흙의 내부마찰각 ϕ 와 같다는 가정 하에서 유도된 것임을 알 수 있다.



- 8 -

표 2.1 흙체기 abcd에 작용하는 힘의 성분

No.	Designation	Vertical Component	Horizontal Component
1	Weight of Wedge abcd: W	$(\gamma H^2/2)(\tan \alpha + \tan \theta) + n\gamma H^2$ $(\tan \alpha + \tan \theta) + (\gamma H^2/2)n^2(\tan \alpha)$	↓ - -
2	Cohesion: $cH \sec \theta$	cH	↑ $cH \tan \theta$ →
3	Adhesion: $c'H \sec \alpha$	$c'H$	↑ $c'H \tan \alpha$ ←
4	Surcharge: Q	$qH \{(\tan \alpha + \tan \theta) + nH \tan \alpha\}$	↓ - -
5	Soil reaction: F	$F \sin(\theta + \phi)$	↑ $F \{ \cos(\theta + \phi) \}$ ←
6	Inertia force: IF	-	- $(W + Q)\alpha_h$ ←
7	Earth Pressure: P	$P \sin(\alpha + \delta)$	↑ $P \cos(\alpha + \delta)$ →

식(2.12)를 간단히 정리하면, 전동적 주동토압 $P_{AE(dyn)}$ 는 식(2.13)과 같이 표현된다.

$$P_{AE(dyn)} = (N_{a\gamma})_{dyn} \gamma H^2 - (N_{ac})_{dyn} cH + (N_{aq})_{dyn} qH \quad (2.13)$$

식(2.13)에서 토압상수 $(N_{a\gamma})_{dyn}$, $(N_{ac})_{dyn}$, $(N_{aq})_{dyn}$ 는 α , n , ϕ , δ , θ 에 의존하며, 무차원 양으로 표시하면 다음과 같다.

$$(N_{a\gamma})_{dyn} = \{ \sin(\eta + \delta)(n + 1/2)(\tan \alpha + \tan \theta) + n^2 \tan \alpha \} \\ \times \{ \cos(\theta + \phi) + \alpha_h \sin(\theta + \phi) \} / \sin(\eta + \delta) \quad (2.14)$$

$$(N_{ac})_{dyn} = \{ \cos \eta \sec \alpha + \cos \phi \sec \theta \} / \sin(\eta + \delta) \quad (2.15)$$

$$(N_{aq})_{dyn} = \{ (n+1) \tan \alpha + \tan \theta \} \times \{ \cos(\theta + \phi) + \alpha_h \sin(\theta + \phi) \} / \sin(\eta + \delta) \quad (2.16)$$

식(2.14), (2.16)에서 토압상수값은 정수 n 값을 포함하고 있으므로 각 계수를 최적화하여 결정하며, 식(2.13)은 주동토압의 상한계를 나타낸다.

정적조건인 경우에 대해서는 $\alpha_h = 0$ 이므로 식(2.14)~(2.16)은 식(2.17)~(2.19)와 같이 바뀌어 쓸 수 있다.

$$(N_{ay})_{stat} = \{ (n+1/2)(\tan \alpha + \tan \theta) + n^2 \tan \alpha \} \cos(\theta + \phi) / \sin(\eta + \delta) \quad (2.17)$$

$$(N_{ac})_{stat} = \{ \cos \eta \sec \alpha + \cos \phi \sec \theta \} / \sin(\eta + \delta) \quad (2.18)$$

$$(N_{aq})_{stat} = \{ (n+1) \tan \alpha + \tan \theta \} \cos(\theta + \phi) / \sin(\eta + \delta) \quad (2.19)$$

정적인 조건에 대해 식(2.13)은 식(2.17)로 변경될 수 있다.

$$P_{AE(stat)} = (N_{ay})_{stat} \gamma H^2 - (N_{ac})_{stat} cH + (N_{aq})_{stat} qH \quad (2.20)$$

식(2.20)은 최대토압 값이며, N_{ac} 는 동적인 경우와 마찬가지로 정적인 경우에도 동일하다.

정적인 경우와 동적인 경우의 토압상수의 비는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\lambda_1 = \frac{(N_{aqm})_{dyn}}{(N_{aqm})_{stat}} \quad (2.21)$$

$$\lambda_2 = \frac{(N_{aqm})_{dyn}}{(N_{aqm})_{stat}} \quad (2.22)$$

식(2.21), (2.22)의 aqm에서 첨자 m은 계수의 최대값을 의미한다.

각 경우에 대해 λ_1 과 λ_2 의 계산값은 거의 유사하고 정수 n값에 따라 변화량이 미세하므로 n의 영향이 무시되며, 주로 α_h 에 따라 변화한다.

2.3 Seed-Whitman 이론

Seed-Whitman은 Mononobe-Okabe 이론에서의 문제점을 보완하여 벽체가 연직이고 뒷채움이 수평인 건조한 비점성토에 대하여 다음과 같이 간편한 계산법을 제안하였다.

- (1) 최대동적주동토압 P_{AE} 는 초기의 정적 및 동적주동토압의 증분을 합한 것과 같다. 즉,

$$\begin{aligned} P_{AE} &= P_A + \Delta P_{AE} \\ &= K_A \frac{\gamma H^2}{2} + \Delta P_{AE} \end{aligned} \quad (2.23)$$

여기서, P_A : 초기의 정적주동토압

ΔP_{AE} : 동적주동토압의 증분

K_A : 초기의 정적주동토압계수

- (2) 동적주동토압의 증분은 그림 2.3과 같이 벽체의 정점으로부터 $(3/4)H$ 거리에 떨어져 있는 흙쇄기 OAB에 작용하는 관성력과 같다.

$$\Delta P_{AE} \simeq \left(\frac{3}{4} k_h \right) \frac{\gamma H^2}{2} \quad (2.24)$$

따라서, 전동적 주동토압은 식 (2.25)와 같이 표현될 수 있다.

$$P_{AE} = \left(K_A + \frac{3}{4} k_h \right) \frac{\gamma H^2}{2} \quad (2.25)$$

- (3) 동적주동토압의 증분 ΔP_{AE} 의 작용점은 저면으로부터 $0.6H$ 에 작용한다.
 (4) 파괴면의 위치는 수평지반가속도계수 k_h 의 크기에 의존하며 OB와 1:1.5의 경사를 갖는 OC면 사이에 존재하게 된다.

Mononobe-Okabe 이론식으로 계산한 K_{AE} 값과 상기에서 제시한 $K_A + (3/4)k_h$ 값을 표 2.2에 비교하였으며, 두 이론에 의한 계산 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

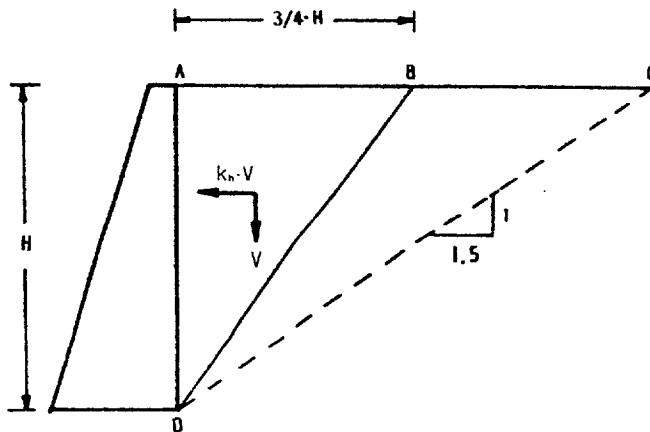


그림 2.3 동적수평토압의 결정에 대한 경험법칙
 (after Seed and Whitman, 1970)

표 2.2 Mononobe-Okabe와 Seed-Whitman 이론에 의한 계산값의 비교

k_h	0	0.1	0.2	0.3	0.4
Mononobe-Okabe (K_{AE})	0.24	0.29	0.37	0.45	0.58
Seed-Whitman ($K_A + (3/4)k_h$)	0.24	0.31	0.39	0.46	0.54

2.4 정성교 · 백승훈 이론

정성교 · 백승훈은 Mononobe-Okabe이론에 아칭개념을 도입하여 토압분포를 구하는 이론식을 개발하였다. Coulomb 이론을 확장시킨 Mononobe-Okabe 이론은 전동적토압을 구하는데 유용하지만 깊이에 따른 토압 분포를 산정하기 위한 이론식은 아니다. 깊이에 따른 토압분포를 알아보기 위해 Handy(1985)는 아칭 개념을 도입하여 연직벽체에 작용하는 정적토압이론식을 제안한 바 있다. 그림 2.4는 흙쌓기에 작용하는 관성력을 구하기 위해 준정적 방법(quasi-static method)인 Mononobe-Okabe의 관성력을 사용하고 벽체가 경사지고 뒷채움이 비점성토로 되어 있을 경우, 미소평면요소에 작용하는 힘에 대하여 연직평형방정식을 취하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$dV + dP_w \cos(\alpha - \delta) + dP_\theta \cos(\theta - \phi) = d(1 - k_v) \quad (2.26)$$

수평평형방정식을 취하여 정리하면 식(2.27)과 같다.

$$dP_\theta = dP_w \frac{\sin(\alpha - \delta)}{\sin(\theta - \phi)} - \frac{k_h dW}{\sin(\theta - \phi)} \quad (2.27)$$

식(2.26)을 식(2.27)에 대입하여 정리하면 식(2.28)과 같다.

$$\begin{aligned} dV + dP_w \cos(\alpha - \delta) [\tan(\alpha - \delta) \cot(\theta - \phi) + 1] \\ = dW [1 - k_v] + k_h \cot(\theta - \phi) \end{aligned} \quad (2.28)$$

여기서,

$$\begin{aligned} dP_w &= \sigma_w \operatorname{cosec} \alpha \sec \delta dz \\ &= K \overline{\sigma_z} \operatorname{cosec} \alpha \sec \delta dz = K(V/B) \operatorname{cosec} \alpha \sec \delta dz \end{aligned}$$

$$dW = C_1 \gamma (H - z) dz$$

$$B = (H - z) C_1$$

$$k_h = \alpha_h / g$$

$$k_v = \alpha_v / g$$

$$C_1 = \frac{\sin(\alpha + \theta)}{\sin \alpha \sin \theta}$$

$$C_2 = \frac{\cos(\alpha - \delta)}{\cos \delta \sin \alpha} \{ \tan(\alpha - \delta) \cot(\theta - \phi) + 1 \}$$

$$C_3 = \frac{C_2}{C_1} K$$

$$C_4 = (1 - k_v) + k_h \cot(\theta - \phi)$$

경계조건 $z = 0$ 에서 $V = 0$ 를 대입하여 식(2.28)의 해를 구하면 식(2.29)와 같이 된다.

$$V = \frac{C_1 C_4 \gamma}{2 - C_3} (H - z)^{C_3} \{ H^{2 - C_3} - (H - z)^{2 - C_3} \} \quad (2.29)$$

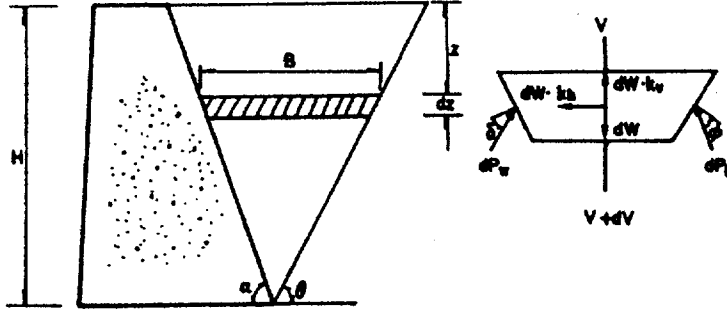


그림 2.4 파괴체기 내의 미소평면요소에 작용하는 힘
(정성교와 백승훈, 1992)

옹벽에 작용하는 토압 $P(z)$ 는 식(2.30)과 같이 된다.

$$P(z) = \frac{C_4 K \cos \delta}{(2 - C_3)} \gamma H \left\{ \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{C_3 - 1} \right\} \quad (2.30)$$

식(2.30)의 토압을 무차원양으로 표시하기 위하여 γH 로 나누면 식(2.31)이 된다.

$$\bar{P}(z) = \frac{C_4 K}{(2 - C_3)} \left\{ \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{C_3 - 1} \left(1 - \frac{z}{H}\right) \right\} \quad (2.31)$$

높이 H 인 옹벽에 작용하는 전주동토압은 식(2.32)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} P_A &= \sec \delta \int_0^H P(z) dz \operatorname{cosec} \alpha \\ &= \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{C_4 K}{C_3 \cos \delta \sin \alpha} \end{aligned} \quad (2.32)$$

옹벽의 저판으로부터 전주동토압이 작용하는 위치 $\bar{h}$ 는 식(2.33)과 같다.

$$\bar{h} = H - \frac{\int_0^H P(z)zdz}{\int_0^H P(z)dz} = \frac{H}{3} \frac{2C_3}{C_3+1} \quad (2.33)$$

토압계수 $K(=\sigma_w/\sigma_z)$ 는 그림 2.5와 같은 Mohr의 응력원으로부터 구할 수 있다.

먼저, $\tau_w = \sigma\delta$ 의 관계로부터

$$\tan \delta = \frac{\sin \phi \sin(180-2\alpha+2\omega)}{1-\sin \phi \cos(180-2\alpha+2\omega)}$$

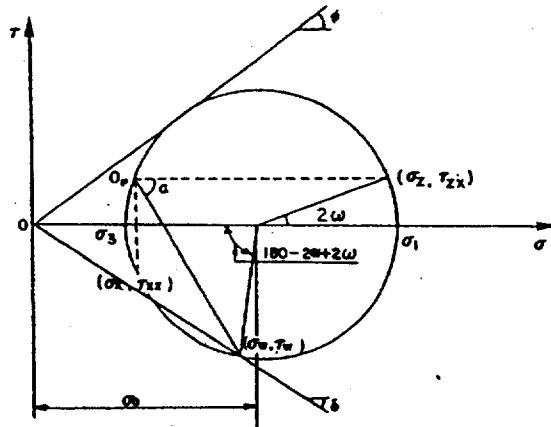
이므로 미지각 2ω 를 구하면 식(2.34)와 같이 얻을 수 있다.

$$2\omega = 2\alpha - \delta + \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha}{\sin \phi}\right) - 180 \quad (2.34)$$

따라서,

$$K = \sigma_w/\sigma_z = \frac{1-\sin \phi \cos(180-2\alpha+2\omega)}{1+\sin \phi \cos 2\omega} \quad (2.35)$$

정성교·백승훈의 연구결과에 의하면 토압분포는 Mononobe-Okabe 이론과 같이 선형분포가 아니라 비선형 분포로 나타났으며, 전토압의 작용위치는 Mononobe-Okabe가 가정한 저면에서 $H/3$ 지점에 있는 것이 아니라 대략 $0.5H-0.6H$ 지점에 작용하였다.



$$\begin{aligned} \sigma_0 &= (\sigma_1 + \sigma_3)/2 & \sigma_z &= \sigma_0(1 + \sin\phi \cos 2\omega) \\ \sigma_w &= \sigma_0\{1 - \sin\phi \cos(180 - 2\alpha + 2\omega)\} & \tau_w &= \sigma_0 \sin\phi \sin(180 - 2\alpha + 2\omega) \end{aligned}$$

그림 2.5 흙과 벽체의 경계면에 대한 Mohr의 응력
(정성교와 백승훈, 1992)

기존이론들의 개념을 살펴보았으며 표 2.3에 이 이론들의 특성 및 문제점을 나타내었다.

표 2.3 기존이론의 비교

이론 제안자	이론 접근법	벽체 형식	토질 정수					관성계수		뒷채움흙	문제점
			α	β	ϕ	c	δ	k_h	k_v		
M-O (1926)	Coulomb이론 의 응용	강성 옹벽	유동	유동	○	×	○	○	○	사질토	• 토압분포: dP_{AE}/dz (가정) • $\bar{h} = H/3$ (가정) 등
S-W (1970)	Coulomb이론 의 응용	강성 옹벽	90°	0°	○	×	○	○	×	사질토	• $P_{AE} = P_A + \Delta P_{AE}$ (가정) • $\Delta P_{AE} \approx 3/4 k_h$ 등
P-S (1966)	Coulomb이론 의 응용	강성 옹벽	90°	0°	○	○	○	○	×	사질토 및 점성토	• 토압분포: $dP_{AE}/dz = P_{ae}(z)$ • $\bar{h} = H/3$ (가정)
C-B (1992)	평면아래 개념	강성 옹벽	90°	0°	○	×	○	○	○	사질토	• $c - \phi$ 불가
R-SE (1971)	Rankin이론 의 응용	강성 옹벽	90°	유동	○	×	×	○	○	사질토	• δ 영향무시 • $\bar{h} = H/3$ (가정) 등

※ M-O : Mononobe-Okabe, S-W : Seed-Whitman, P-S : Prakash-Saran, C-B : 정성교-백승훈,

R-SE : Rankin계 직진토압; ○ : 고려함, × : 고려하지 않음

3. 준정적 토압이론식

3.1 $c-\phi$ 흙에 대한 토압이론식의 유도

3.1.1 준정적 해석법에 의한 이론식

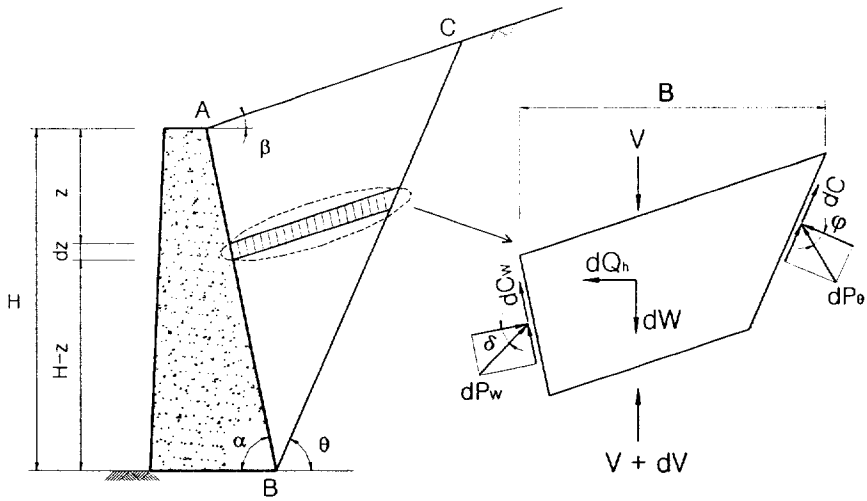
본 연구에서는 2.1에서 언급한 Mononobe-Okabe의 가정을 근거로하여 아칭 이론을 도입시켜 비점성토 및 점성토에 적용할 수 있는 동적토압이론식을 유도하였다.

그림 3.1과 같이 높이 H , 벽면의 경사 α , 뒷채움의 경사 β 인 벽체에 대하여 깊이 z 아래에 있는 미소평면요소가 있다고 하면, 이 요소의 두께는 dz 이며, 폭이 B 이고 무게는 dW 이다. 이 요소에 작용하는 외력은 연직력과 그 중분이 각각 V 및 dV 이며, 두 측면에 작용하는 반력이 각각 dPW 및 $dP\theta$ 이며, 부착력 및 점착력은 각각 dCW 및 dC 이고, 그리고 수평관성력 dQh 이다. 여기서 식중에 있는 이중기호는 위의 부호는 주동상태, 아래부호는 수동상태로 정의하며, 앞으로 모든 식들에 같은 방법으로 정의한다. 이 미소요소에 작용하는 연직평형방정식을 취하면 식(3.1)과 같이 된다.

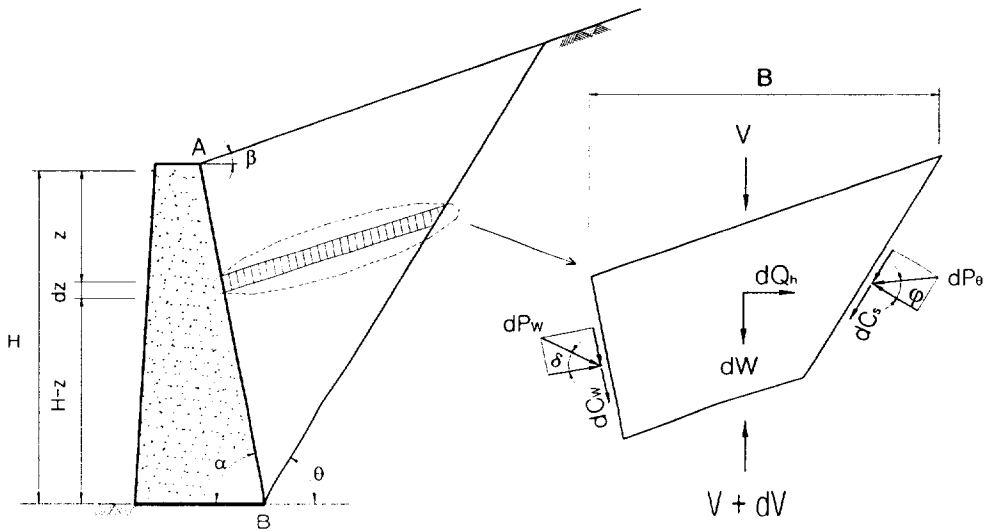
$$\begin{aligned} dV + dP_w \cos(\alpha \mp \delta) + dP_\theta \cos(\theta \mp \phi) \pm dC_w \sin \alpha \pm dC \sin \theta \\ = (1 - k_v) dW \end{aligned} \quad (3.1)$$

수평평형방정식을 취하여 그 결과를 정리하면 식(3.2)와 같다.

$$dP_\theta = \{dP_w \sin(\phi \mp \delta) \mp dC_w \cos \alpha \pm dC \cos \theta \mp k_h dW\} / \sin(\theta \mp \phi) \quad (3.2)$$



(a) 주동상태



(b) 수동상태

그림 3.1 파괴체기내의 미소평면요소에 작용하는 힘

식(3.2)를 식(3.1)에 대입하여 정리하면 식(3.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & dV + \{ \cos(\alpha \mp \delta) + \sin(\alpha \mp \delta) \cot(\theta \mp \phi) \} dP_w \\
 & \pm \{ \sin \alpha - \cos \alpha \cot(\theta \mp \phi) \} dC_w \\
 & \pm \{ \sin \theta + \cos \theta \cot(\theta \mp \phi) \} dC \\
 & = \{ (1 - k_v) \pm \cot(\theta - \phi) k_h \} dW
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

여기서, 토압계수 $K^* = (\sigma_w \pm c' \cot \phi) / (\overline{\sigma_z} \cos^2 \beta \pm c' \cot \phi)$ 라 정의하고 평균연직 응력을 $\overline{\sigma_z} = V/B$ 라 가정하면, 미소평면요소에 작용하는 벽체의 토압력 및 계수들은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 dP_w &= \sqrt{\sigma_w^2 + (\sigma_w \tan \delta)^2} \csc \alpha dz \\
 &= \sigma_w \sec \delta \csc \alpha dz \\
 &= [K^* \overline{\sigma_z} \cos^2 \beta \pm (K^* - 1) c' \cot \phi] \sec \delta \csc \alpha dz \\
 &= \left[\frac{K^* \cos^2 \beta}{C_1} \frac{V}{H - z} \pm (K^* - 1) c' \cot \phi \right] \sec \delta \csc \alpha dz
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

여기서, dP_w : 미소평면에 작용하는 전주동토압의 증분

$$dC_w = c_w \csc \alpha dz \tag{3.5}$$

$$dC = c'(1 + C_1 \tan \beta) \csc \theta dz \tag{3.6}$$

$dW \simeq \gamma C_2 (H-z) dz$: 미소평면요소에 대한 파괴체기의 무게

$B = C_1 (H-z)$: 미소평면요소의 폭

$$C_1 = \frac{\cos \beta \sin(\alpha + \theta)}{\sin \alpha \sin(\theta - \beta)}$$

$$C_2 = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \cos \beta} C_1 \left(= \frac{C_1 (1 + C_1 \tan \beta) \sin(\theta - \beta)}{\cos \beta \sin \theta} \right)$$

$$C_3 = \cos(\alpha \mp \delta) + \sin(\alpha \mp \delta) \cot(\theta \mp \phi)$$

$$C_4 = \csc \alpha \{ \sin \alpha - \cos \alpha \cot(\theta \mp \phi) \} a_n + \csc \theta \{ \sin \theta + \cos \theta \cot(\theta \mp \phi) \} \\ \times (1 + C_1 \tan \beta) \pm C_3 (K^* - 1) \cot \phi \sec \delta \csc \alpha$$

$$C_5 = \frac{K^* C_3}{C_1} \cos^2 \beta \sec \delta \csc \alpha$$

$$C_6 = (1 - k_v) \pm \cot(\theta - \phi) k_h$$

$$k_h = \alpha_h / g$$
 : 수평지진가속도계수

$$k_v = \alpha_v / g$$
 : 연직지진가속도계수

$$dQ_h = k_h dW$$
 : 미소평면요소에 작용하는 수평지진관성력

$$dQ_v = k_v dW$$
 : 미소평면요소에 작용하는 연직지진관성력

$$a_n = c_w / c'$$
 : 흙의 점착력에 대한 벽면의 부착력의 비

V : 미소평면요소에 작용하는 연직력

c_w : 벽면에 작용하는 부착력 c' : 흙의 점착력

α_h : 지진시의 수평지진가속도 α_v : 지진시의 연직지진가속도

g : 중력가속도

전술한 미소평면요소에 작용하는 토압력 및 계수들을 식(3.3)에 대입하여 다시 정리하면 식(3.7)과 같다.

$$\frac{dV}{dz} + \frac{C_5}{H-z} V = \frac{C_2 C_6 \gamma}{C_5 - 2} (H-z) \mp C_4 c' \quad (3.7)$$

식(3.7)의 선형 1계 미분방정식 해를 구하면 식(3.8)과 같다.

$$\begin{aligned} V &= \text{EXP} \left(- \int \frac{C_5}{H-z} dz \right) \int \left[\{ C_2 C_6 (H-z) \mp C_4 c' \} \text{EXP} \left(\int \frac{C_5}{H-z} dz \right) \right] dz \\ &= (H-z)^{C_5} \left[\frac{C_2 C_6 \gamma}{C_5 - 2} (H-z)^{2-C_5} \mp \frac{C_4 c'}{C_5 - 1} (H-z)^{1-C_5} + C \right] \quad (3.8) \end{aligned}$$

여기서, C : 적분상수

식(3.8)에 대해 경계조건 $z=0$, $V=0$ 을 만족시키는 적분상수 C 를 구하면 식(3.9)와 같다.

$$C = \mp \frac{C_2 C_6 \gamma}{C_5 - 2} H^{2-C_5} \pm \frac{C_4 c'}{C_5 - 1} H^{1-C_5} \quad (3.9)$$

식(3.9)를 식(3.8)에 대입하여 정리한 결과는 식(3.10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V = & (H-z)^{C_5} \left[\frac{C_2 \gamma}{C_5-2} \{ (1-k_v) \pm \cot(\theta-\phi) k_h \} \right. \\
 & \times \{ (H-z)^{2-C_5} - H^{2-C_5} \} \\
 & \left. \mp \frac{C_4 c'}{C_5-1} \{ (H-z)^{1-C_5} - H^{1-C_5} \} \right] \quad (3.10)
 \end{aligned}$$

벽체에 작용하는 임의의 깊이 z 에 따른 동적토압 $P_w(z) (= \sigma_w \sec \delta)$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_w(z) = \sigma_w \sec \delta = (K^* \overline{\sigma_z} \cos^2 \beta \pm (K^* - 1) c' \cot \phi) \sec \delta \quad (3.11a)$$

$$\begin{aligned}
 = & \left[\frac{K^* C_2 \cos^2 \beta}{C_1(C_5-2)} \left\{ \left(1 - \frac{z}{H}\right) - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{C_5-1} \right\} \gamma H \right. \\
 & \mp \left[\frac{K^* C_4 \cos^2 \beta}{C_1(C_5-1)} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{C_5-1} \right\} \mp (K^* - 1) \cot \phi \right] c' \quad (3.11b) \\
 & \left. + \frac{K^* C_2 \cos^2 \beta}{C_1(C_5-2)} \{ \mp \cot(\theta \mp \phi) k_h - k_v \} \left\{ \left(1 - \frac{z}{H}\right) - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{C_5-1} \right\} \gamma H \right] \sec \delta
 \end{aligned}$$

또는,

$$\begin{aligned}
P_w(z) &= \left\{ \frac{P_{ae}(z)}{P_{ae}(z)} \right\} \sec \delta \\
&= \left[\left\{ \frac{K_{sae}(z)}{K_{spe}(z)} \right\} \gamma H + \left\{ \frac{K_{dae}(z)}{K_{dpe}(z)} \right\} \gamma H \right] \sec \delta
\end{aligned} \tag{3.12}$$

또는,

$$\begin{aligned}
P_w(z) &= \left[\left[\left\{ \frac{K_\gamma(z)}{K_\gamma(z)} \right\} \mp \left\{ \frac{K_{ac}(z)}{K_{pc}(z)} \right\} M \right] \gamma H \right. \\
&\quad \left. + \left\{ \frac{K_{dae}(z)}{K_{dpe}(z)} \right\} \gamma H \right] \sec \delta
\end{aligned} \tag{3.13}$$

여기서,

$$\left\{ \frac{K_{a\gamma}(z)}{K_{p\gamma}(z)} \right\} = \frac{K^* C_2 \cos^2 \beta}{C_1(C_5 - 2)} \left\{ \left(1 - \frac{z}{H}\right) - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{C_5 - 1} \right\} \tag{3.14}$$

$$\left\{ \frac{K_{ac}(z)}{K_{pc}(z)} \right\} = \frac{K^* C_4 \cos^2 \beta}{C_1(C_5 - 1)} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{C_5 - 1} \right\} \mp (K^* - 1) \cot \phi \tag{3.15}$$

$$\left\{ \frac{K_{sae}(z)}{K_{spe}(z)} \right\} = \left\{ \frac{K_{a\gamma}(z)}{K_{p\gamma}(z)} \right\} \mp \left\{ \frac{K_{ac}(z)}{K_{pc}(z)} \right\} M \tag{3.16}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{dae}(z) \\ K_{dpe}(z) \end{array} \right\} = \frac{K^* C_2 \cos^2 \beta}{C_1(C_5 - 2)} \{ \mp \cot(\theta \mp \phi) k_h - k_v \} \quad (3.17)$$

$$\left\{ \left(1 - \frac{z}{H}\right) - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{C_5 - 1} \right\}$$

식(3.11b)를 무차원의 토압 $K_w(z) (= P_w(z) / \gamma H)$ 로 표시하면 식(3.18)과 같다.

$$K_w(z) = \left\{ \begin{array}{l} K_{ae}(z) \\ K_{pe}(z) \end{array} \right\} \sec \delta = \left[\left\{ \begin{array}{l} K_{sae}(z) \\ K_{spe}(z) \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} K_{dae}(z) \\ K_{dpe}(z) \end{array} \right\} \right] \sec \delta \quad (3.18)$$

또는,

$$K_w(z) = \left[\left\{ \begin{array}{l} K_{ay}(z) \\ K_{py}(z) \end{array} \right\} \mp \left\{ \begin{array}{l} K_{ac}(z) \\ K_{pc}(z) \end{array} \right\} M + \left\{ \begin{array}{l} K_{dae}(z) \\ K_{dpe}(z) \end{array} \right\} \right] \sec \delta \quad (3.19)$$

식(3.19)에서 $M = c' / \gamma H$ 로 정의하며 무차원의 점착력이라 부른다.

높이 H 인 벽체에 작용하는 전동적토압 P_w 는 식(3.11b)를 벽체의 전높이 H 에 대하여 적분하면 식(3.20)과 같다.

$$P_w = \int_0^H dP_w dz / \sin \alpha$$

$$= \frac{1}{\sin \alpha \cos \delta} \int_0^H P_w(z) dz \quad (3.20)$$

$$P_w = \begin{Bmatrix} P_{AE} \\ P_{PE} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{SAE} \\ K_{SPE} \end{Bmatrix} \frac{\gamma H^2}{2} + \begin{Bmatrix} K_{DAE} \\ K_{DPE} \end{Bmatrix} \frac{\gamma H^2}{2} \quad (3.21)$$

또는,

$$P_w = \begin{Bmatrix} P_{AE} \\ P_{PE} \end{Bmatrix} = \left[\begin{Bmatrix} K_{A\gamma} \\ K_{P\gamma} \end{Bmatrix} \mp 2 \begin{Bmatrix} K_{AC} \\ K_{PC} \end{Bmatrix} M \right] \frac{\gamma H^2}{2} + \begin{Bmatrix} K_{DAE} \\ K_{DPE} \end{Bmatrix} \frac{\gamma H^2}{2} \quad (3.22)$$

여기서,

$$\begin{Bmatrix} K_{A\gamma} \\ K_{P\gamma} \end{Bmatrix} = \frac{K^* C_2 \cos^2 \beta}{\sin \alpha \cos \delta C_1 C_5} \quad (3.23)$$

$$\begin{Bmatrix} K_{AC} \\ K_{PC} \end{Bmatrix} = \frac{K^* C_4 \cos^2 \beta}{\sin \alpha \cos \delta C_1 C_5} \mp (K^* - 1) \cot \phi \quad (3.24)$$

$$\begin{Bmatrix} K_{SAE} \\ K_{SPE} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{A\gamma} \\ K_{P\gamma} \end{Bmatrix} \mp 2 \begin{Bmatrix} K_{AC} \\ K_{PC} \end{Bmatrix} M \quad (3.25)$$

$$\begin{Bmatrix} K_{DAE} \\ K_{DPE} \end{Bmatrix} = \frac{K^* C_2 \cos^2 \beta}{\sin \alpha \cos \delta C_1 C_5} \{ \cot(\theta \mp \phi) k_h - k_v \} \quad (3.26)$$

식(3.21) 및 식(3.22)를 무차원의 전토폰 $K_w (= P_w / (\gamma H^2/2))$ 로 표시하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_w = \begin{Bmatrix} K_{AE} \\ K_{PE} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{SAE} \\ K_{SPE} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} K_{DAE} \\ K_{DPE} \end{Bmatrix} \quad (3.27)$$

또는,

$$K_w = \begin{Bmatrix} K_{A\gamma} \\ K_{P\gamma} \end{Bmatrix} \mp 2 \begin{Bmatrix} K_{AC} \\ K_{PC} \end{Bmatrix} M + \begin{Bmatrix} K_{DAE} \\ K_{DPE} \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

여기서,

$$\begin{Bmatrix} K_{SAE} \\ K_{SPE} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{A\gamma} \\ K_{P\gamma} \end{Bmatrix} \mp 2 \begin{Bmatrix} K_{AC} \\ K_{PC} \end{Bmatrix} M \quad (3.29)$$

벽체 저면 으로부터 전동적토폰의 작용점위치 $\bar{h}$ 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{h}} = \begin{Bmatrix} h_a/H \\ h_p/H \end{Bmatrix} = \frac{\int_0^H dP_w \sin(\alpha \mp \delta) (H-z) dz / \sin \alpha}{\int_0^H dP_w \sin(\alpha \mp \delta) dz / \sin \alpha} \quad (3.30a)$$

$$= \frac{\int_0^H P_w(z) (H-z) dz}{\int_0^H P_w(z) dz} \quad (3.30b)$$

$$= \begin{Bmatrix} C_a \\ C_p \end{Bmatrix} H \quad (3.30c)$$

여기서,

$$\begin{Bmatrix} C_a \\ C_p \end{Bmatrix} = \frac{C_5 \left[\frac{C_2}{3} \mp \frac{C_7}{2} M + \frac{C_2}{3} \{ \pm \cot(\theta \mp \phi) k_h - k_v \} \right]}{(C_5 + 1) \left[\frac{C_2}{2} \mp C_8 M + \frac{C_2}{2} \{ \pm \cot(\theta \mp \phi) k_h - k_v \} \right]} \quad (3.31)$$

$$\text{여기서, } C_7 = C_4 \mp \frac{C_1 (C_5 + 1)}{K^* \cos^2 \beta} (K^* - 1) \cot \phi$$

$$C_8 = C_4 \mp \frac{C_1 C_5}{K^* \cos^2 \beta} (K^* - 1) \cot \phi$$

3.2 토압계수 K^* 의 결정

그림 3.2는 Mohr의 응력원에서 깊이 z 아래에 있는 임의의 요소에 작용하는 각각의 응력값들을 나타내며, 주동상태인 경우에는 K_a^* , 수동상태인 경우에는 K_p^* 를 나타낸다. 또한, 기하학적인 관계로부터 구한 응력값들을 표 3.1과 같이 요약할 수 있다.

그림 3.2에서 실제옹벽에 작용하는 응력들로부터

$$\frac{\tau_w}{\sigma_w + c' \cot \phi} = \frac{\sin \phi \sin 2\chi}{1 \mp \sin \phi \cos 2\chi} \quad (3.32)$$

즉,

$$\tau_w = \left(\frac{\cos \phi \sin 2\chi}{1 \mp \sin \phi \cos 2\chi} c' \right) + \sigma_w \left(\frac{\sin \phi \sin 2\chi}{1 \mp \sin \phi \cos 2\chi} \right) \quad (3.33)$$

그리고 $\tau_w = c_w + \sigma_w \tan \delta_w$ 의 관계가 있으므로 식(3.33)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_w = \frac{\cos \phi \sin 2\chi}{1 \mp \sin \phi \cos 2\chi} c' \quad (3.34)$$

$$\tan \delta = \frac{\sin \phi \sin 2\chi}{1 \mp \sin \phi \cos 2\chi} \quad (3.35)$$

각 2χ 는 Mohr 원에서 기하학적인 관계로부터

$$2\chi = \begin{Bmatrix} 2\chi_1 \\ 2\chi_2 \end{Bmatrix} = 180 - 2\alpha - 2\beta + \begin{Bmatrix} 2\omega_1 \\ 2\omega_2 \end{Bmatrix} \quad (3.36)$$

식(3.35)와 (3.36)으로 부터 미지각 2ω 를 구할 수 있다.

$$2\omega = \begin{Bmatrix} 2\omega_1 \\ 2\omega_2 \end{Bmatrix} = 2\alpha + 2\beta \mp \delta + \sin^{-1}(\sin \delta / \sin \phi) \quad (3.37)$$

여기서, 그림 3.2의 $2\omega_1$ 및 $2\omega_2$ 는 각각 주동상태 및 수동상태의 미지각이다.

따라서, 토압계수 K^* 는 앞의 정의에 따라 정의하면 다음과 같다.

$$K^* = \frac{\sigma_w + c' \cot \phi}{\sigma_z \cos^2 \beta + c' \cot \phi} = \begin{Bmatrix} K_a^* \\ K_p^* \end{Bmatrix} = \frac{1 \mp \sin \phi \cos 2\chi}{1 \pm \sin \phi \cos 2\omega} \quad (3.38)$$

표 3.1 Mohr 응력원 에서의 응력

주동상태	수동상태
$\sigma_a = (\sigma_{1a} + \sigma_{3a}) / 2 + c' \cot \phi$	$\sigma_p = (\sigma_{1p} + \sigma_{3p}) / 2 + c' \cot \phi$
$\sigma_{za} = \sigma_a (1 + \sin \phi \cos 2\omega_1) - c' \cot \phi$ $= \overline{\sigma_z} \cos^2 \beta$	$\sigma_{zp} = \sigma_p (1 - \sin \phi \cos 2\omega_2) - c' \cot \phi$ $= \overline{\sigma_z} \cos^2 \beta$
$\sigma_x = \sigma_a \{1 - \sin \phi \cos (2\alpha + 2\beta - 2\omega_1)\}$ $- c' \cot \phi$	$\sigma_x = \sigma_p \{1 + \sin \phi \cos (2\alpha + 2\beta - 2\omega_2)\}$ $- c' \cot \phi$
$\sigma_w = \sigma_a (1 - \sin \phi \cos 2\chi_1) - c' \cot \phi$	$\sigma_w = \sigma_p (1 + \sin \phi \cos 2\chi_2) - c' \cot \phi$
$\tau_w = \sigma_a \sin \phi \sin 2\chi_1$	$\tau_w = \sigma_p \sin \phi \sin 2\chi_2$

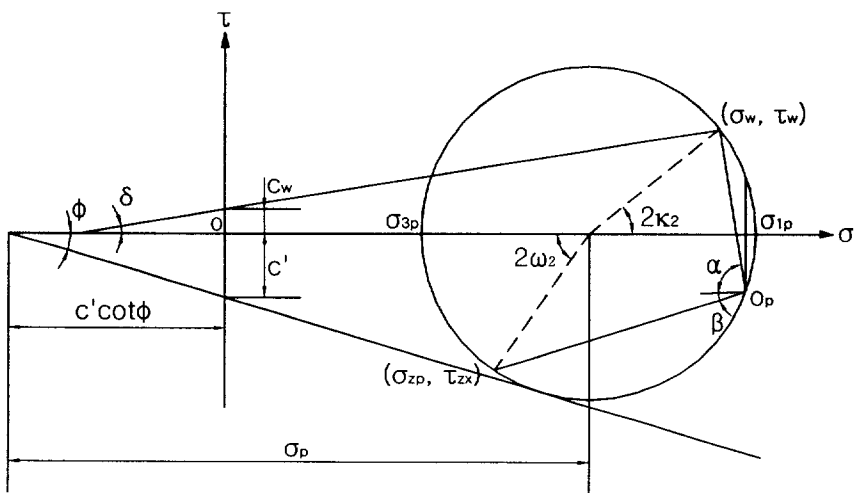
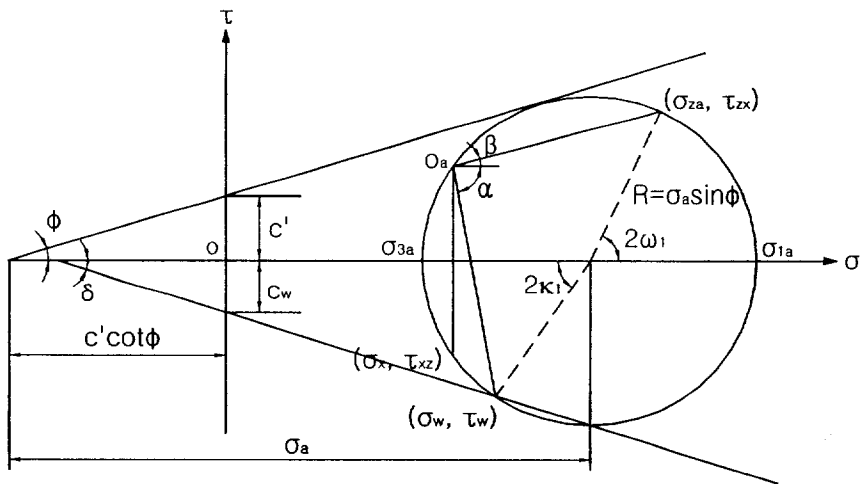


그림 3.2 흙과 벽체의 경계면에 대한 Mohr 응력원

췘기에 작용하는 힘들에 대해 연직평형방정식을 취하여 그 결과를 정리하면,

$$W_1 = P_w \cos(\alpha \mp \delta - \lambda) + P_\theta \cos(\theta \mp \phi + \lambda) + C_w \sin(\alpha - \lambda) + C \sin(\theta + \lambda) \quad (3.41)$$

수평평형방정식을 취하면 다음 식과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$P_\theta = \frac{\sin(\alpha \mp \delta - \lambda)}{\sin(\theta \mp \phi + \lambda)} P_w \mp \frac{\cos(\alpha - \lambda)}{\sin(\theta \mp \phi + \lambda)} C_w + \frac{\cos(\theta + \lambda)}{\sin(\theta \mp \phi + \lambda)} C \quad (3.42)$$

식(3.42)를 식(3.41)에 대입하면 식(3.43)과 같이 된다.

$$W_1 = \{ \cos(\alpha \mp \delta - \lambda) + \sin(\alpha \mp \delta - \lambda) \cot(\theta \mp \phi + \lambda) \} P_w + \{ \sin(\alpha - \lambda) - \cos(\alpha - \lambda) \cot(\theta \mp \phi + \lambda) \} C_w + \{ \sin(\theta + \lambda) + \cos(\theta + \lambda) \cot(\theta \mp \phi + \lambda) \} C \quad (3.43)$$

여기서,

$$C_w = \overline{AB} \ c_w = c_w H / \sin \alpha \quad (3.44)$$

$$C = \overline{BC} \ c' = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \sin(\theta - \beta)} c' H \quad (3.45)$$

식(3.43)을 식(3.41)에 대입하여 정리하면 전동적토평 P_w 는 식(3.46)과 같다.

$$\begin{aligned}
P_w &= \left\{ \begin{matrix} P_{AE} \\ P_{PE} \end{matrix} \right\} = \frac{\cos a - \cos(b+2\theta)}{\cos c - \cos(d+2\theta)} q \frac{1}{2} \gamma H^2 \\
&= \frac{\cos a - \cos(b+2\theta)}{\cos c - \cos(d+2\theta)} q \frac{1}{2} \gamma H^2 \\
&\quad \mp \left\{ \frac{\sin e - \sin(f+2\theta)}{\cos c - \cos(d+2\theta)} r a_n + \frac{s}{\cos c - \cos(d+2\theta)} \right\} c' H
\end{aligned} \tag{3.46}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
a &= \alpha \pm \phi - \lambda & q &= (\sin(\alpha + \beta) / \sin^2 \alpha) \sqrt{k_h^2 + (1 - k_v)^2} \\
b &= \alpha \mp \phi + \lambda & r &= 1 / \sin \alpha \\
c &= \alpha + \beta \mp \delta - \phi & s &= 2 \cos \phi \sin(\alpha + \beta) / \sin \alpha \\
d &= \alpha - \beta \mp \delta \mp \phi & a_n &= c_w / c' \\
e &= \alpha + \beta \mp \phi & f &= \alpha - \beta \mp \phi \\
\lambda &= \tan^{-1}(\pm k_h / (1 - k_v))
\end{aligned}$$

식(3.46)에 의한 계산결과는 식(3.22)에 의한 것과 정확히 일치하였다.

그림 3.3에서 수평면과 파괴면이 이루는 한계각 θ 를 구하기 위하여 전동적토압 P_w 가 최대 및 최소가 되는 조건 $\partial P_w / \partial \theta = 0$ 으로부터 식(3.47)과 같은 한계각 θ 를 결정할 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{(A^2 + B^2 - BC) + A\sqrt{(A^2 + B^2 - C^2)}}{2(A^2 + B^2)} \right\}^{1/2} \tag{3.47}$$

여기서,

$$A = \pm [(\cos b \cos c - \cos a \cos d) q \frac{1}{2} \gamma H \pm \{ (\cos d \sin e - \cos c \sin f) r a_n + \cos d s \} c'] \quad (3.48)$$

$$B = \pm [(\sin b \cos c - \cos a \sin d) q \frac{1}{2} \gamma H \pm \{ (\sin d \sin e + \cos c \cos f) r a_n + \sin d s \}] c' \quad (3.49)$$

$$C = \pm (\sin g q \frac{1}{2} \gamma H \pm \cosh r a_n) c' \quad (3.50)$$

$$g = b - d = \beta \pm \delta + \lambda, \quad h = d - f = \mp \delta$$

3.3.2 본 연구에서의 제안방법

그림 3.3과 같이 흙썰기 ABC에 작용하는 힘들이 평형상태를 이룰 때 힘의 평형방정식을 적용할 수 있다. 먼저 연직평형방정식을 취하면 식(3.51)을 얻을 수 있다.

$$(1 - k_v) W = P_w \cos(\alpha \mp \delta) + P_\theta \cos(\theta \mp \phi) \pm C_w \sin \alpha \pm C \sin \theta \quad (3.51)$$

수평평형방정식을 취하면 식(3.52)와 같다.

$$P_\theta = \{ \sin(\alpha \mp \delta) P_w \mp \cos \alpha C_w \pm \cos \theta C \mp k_h W \} / \sin(\theta \mp \phi) \quad (3.52)$$

식(3.52)를 식(3.51)에 대입하여 정리한 결과는 식(3.53)과 같다.

$$\begin{aligned}
 W = & \{ \cos(\alpha \mp \delta) + \sin(\alpha \mp \delta) \cot(\theta \mp \phi) \} P_w \\
 & \pm \{ \sin \alpha - \cos \alpha \cot(\theta - \phi) \} C_w \\
 & \pm \{ \sin \theta + \cos \theta \cot(\theta \mp \phi) \} C - \{ \pm \cot(\theta \mp \phi) k_h - k_v \} W
 \end{aligned} \tag{3.53}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{1}{2} \overline{BC} \cdot \overline{AD} \cdot \gamma \\
 &= \frac{\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha + \theta)}{\sin^2 \alpha \sin(\theta - \beta)} \frac{1}{2} \gamma H^2
 \end{aligned} \tag{3.54}$$

$$C_w = \frac{c_w H}{\sin \alpha} \tag{3.55}$$

$$C = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \sin(\theta - \beta)} c' H \tag{3.56}$$

식(3.53)을 다시 정리하여 전동적토압 P_w 를 구한 결과는 식(3.57)과 같다.

$$P_w = \left\{ \begin{matrix} P_{AE} \\ P_{PE} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} K_{SAE} \\ K_{SPE} \end{matrix} \right\} \frac{\gamma H^2}{2} \pm \left\{ \begin{matrix} K_{DAE} \\ K_{DPE} \end{matrix} \right\} \frac{\gamma H^2}{2} \tag{3.57}$$

또는,

$$P_w = \left[\left\{ \begin{array}{c} K_{A\gamma} \\ K_{P\gamma} \end{array} \right\} \mp 2 \left\{ \begin{array}{c} K_{AC} \\ K_{PC} \end{array} \right\} M \right] \frac{\gamma H^2}{2} \pm \left\{ \begin{array}{c} K_{DAE} \\ K_{DPE} \end{array} \right\} \frac{\gamma H^2}{2} \quad (3.58)$$

여기서,

$$\left\{ \begin{array}{c} K_{A\gamma} \\ K_{P\gamma} \end{array} \right\} = \frac{\cos a - \cos(b+2\theta)}{\cos c - \cos(d+2\theta)} q \quad (3.59)$$

$$\left\{ \begin{array}{c} K_{AC} \\ K_{PC} \end{array} \right\} = \frac{\sin e - \sin(f+2\theta)}{\cos c - \cos(d+2\theta)} r a_n + \frac{s}{\cos c - \cos(d+2\theta)} \quad (3.60)$$

$$\left\{ \begin{array}{c} K_{SAE} \\ K_{SPE} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} K_{A\gamma} \\ K_{P\gamma} \end{array} \right\} \mp 2 \left\{ \begin{array}{c} K_{AC} \\ K_{PC} \end{array} \right\} M \quad (3.61)$$

$$\left\{ \begin{array}{c} K_{DAE} \\ K_{DPE} \end{array} \right\} = \left\{ \frac{\sin a + \sin(b+2\theta)}{\cos c - \cos(d+2\theta)} k_h - \frac{\cos a - \cos(b+2\theta)}{\cos c - \cos(d+2\theta)} k_v \right\} q \quad (3.62)$$

여기서, $a = \alpha \pm \phi$

$$f = \alpha - \beta \mp \phi$$

$$b = \alpha \mp \phi$$

$$q = \sin(\alpha + \beta) / \sin^2 \alpha$$

$$c = \alpha + \beta \mp \delta \mp \phi$$

$$r = 1 / \sin \alpha$$

$$d = \alpha - \beta \mp \delta \mp \phi$$

$$s = 2 \cos \phi \sin(\alpha + \beta) / \sin \alpha$$

$$e = \alpha + \beta \mp \phi$$

$$a_n = c_w / c'$$

식(3.57) 및 식(3.58)을 무차원의 전동적토포압 $K_w (= P_w / (\gamma H^2 / 2))$ 로 나타내면 식(3.63)과 같이 표현된다.

$$K_w = \left\{ \begin{matrix} K_{SAE} \\ K_{SPE} \end{matrix} \right\} \pm \left\{ \begin{matrix} K_{DAE} \\ K_{DPE} \end{matrix} \right\} \quad (3.63)$$

또는,

$$K_w = \left\{ \begin{matrix} K_{A\gamma} \\ K_{P\gamma} \end{matrix} \right\} \mp 2 \left\{ \begin{matrix} K_{AC} \\ K_{PC} \end{matrix} \right\} M \pm \left\{ \begin{matrix} K_{DAE} \\ K_{DPE} \end{matrix} \right\} \quad (3.64)$$

여기서,

$$\left\{ \begin{matrix} K_{SAE} \\ K_{SPE} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} K_{A\gamma} \\ K_{P\gamma} \end{matrix} \right\} \mp 2 \left\{ \begin{matrix} K_{AC} \\ K_{PC} \end{matrix} \right\} M \quad (3.65)$$

한계각 θ 를 구하기 위하여 전동적토포압 P_w 가 최대 및 최소가 되는 조건 ($= \partial P_w / \partial \theta$)을 구하면 식(3.66)과 같은 한계각 θ 를 얻을 수 있다

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{(A^2 + B^2 - BC) + A\sqrt{(A^2 + B^2 - C^2)}}{2(A^2 + B^2)} \right\}^{1/2} \quad (3.66)$$

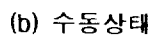
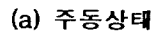
여기서,

$$\begin{aligned} A = & \pm [(\cos b \cos c - \cos a \cos d) q (\gamma H / 2) \\ & \pm \{(\cos d \sin e - \cos c \sin f) r a_n + \cos d s\} c' \\ & - \{(\sin a \cos d + \sin b \cos c) k_h \\ & + (\cos b \cos c - \cos a \cos d) k_v\} q (\gamma H / 2)] \end{aligned} \quad (3.67)$$

$$\begin{aligned} B = & \pm [(\sin b \cos c - \cos a \sin d) q \gamma H / 2 \\ & \pm \{(\sin d \sin e - \cos c \cos f) r a_n + \sin d s\} c' \\ & - \{(\sin a \sin d - \cos b \cos c) k_h \\ & + (\sin b \cos c - \cos a \sin d) k_v\} q (\gamma H / 2)] \end{aligned} \quad (2.68)$$

$$\begin{aligned} C = & \pm [\sin g q \gamma H / 2 \pm \cosh r a_n c' \\ & + (\cos g k_h - \sin g k_v) q (\gamma H / 2)] \end{aligned} \quad (3.69)$$

$$g = b - d = \beta \pm \delta, \quad h = d - f = \mp \delta$$



4. 기존의 이론 결과와의 비교

본 절에서는 본 연구에서 유도한 동적토압 이론식과 기존의 이론들에 의한 계산결과를 비교하고자 한다.

이 비교를 위하여 사용된 매개변수들은 일반적인 경우의 수치로 먼저 옹벽에서 벽체배면의 경사각 $\alpha=90^\circ$ 이고 옹벽의 높이 따로 없이 깊이비(z/H)로 나타내었다. 그리고 뒷채움 흙에서 경사각 $\beta=0$, 벽면마찰각 $\delta=\phi/2$, 내부마찰각 $\phi=35^\circ$, 수평 및 연직 지진가속도계수 $k_h=0.2$, $k_v=0.0$ 을 사용하였다. 그리고 상·하향 연진지진가속도계수에 영향은 $k_h=0.2$, $k_v=\pm 0.1$ 을 사용하였다.

비교된 기존의 이론들은 Mononobe-Okabe 이론, Parakash-Saran 이론, Seed-Whitman 이론, 정성교-백승훈 이론이다.

여기서는 먼저 기존 과 수정 Mononobe-Okabe 이론에 의한 동적토압분포에 대하여 비교·고찰하며, 그리고 설계에 직접적으로 필요한 전주동토압 및 힘의 작용점위치에 대하여 비교·분석하고자 한다.

4.1 동적주동토압 분포

그림 4.1은 기존의 동적주동토압 이론과 본 연구에서 유도한 수정 Mononobe-Okabe 이론식으로부터 계산된 동적주동토압($K_{ae}(z)$)분포를 비교하여 도시한 것으로, $K_{ae}(z)$ 는 동적토압의 무차원 값으로 $P_{ae}(z)/(\gamma H)$ 이다.

그림 4.1에서 보면 Parakash-Saran와 Seed-Whitman 이론에 의한 토압분포는 Mononobe-Okabe 이론에 의한 토압분포와 거의 일치하며 선형적인 분포를 나타내지만, 본 연구의 결과와 정성교-백승훈 이론에 의한 토압은 비선형적으로 분포하는 것으로 나타났다. 그리고 정성교-백승훈 이론에 의한 토압의 크기와

본 연구의 결과와 비교해보면 지표면으로부터 약 0.6H 깊이까지는 거의 일치하나, 0.6H 이후의 깊이에서는 본 연구의 결과가 다소 크게 나타났다.

옹벽하단에 작용하는 토압이 0이 되는 이유는 아칭효과와 옹벽 조건이 상부는 변위를 허용하고 하부는 고정시켰기 때문일 것으로 사료된다.

4.2 전동적주동토압계수

그림 4.2는 기존의 이론과 수정 Mononobe-Okabe 이론에 의하여 계산된 수평 지진가속도계수의 변화에 따른 전 동적 주동토압을 무차원화한 K_{AE} 의 영향을 나타내었다.

정적 조건에서는 기존 이론과 수정 Mononobe-Okabe 이론이 모두 Coulomb의 이론을 근거로 하기 때문에 정적인 조건에서는 K_{AE} 의 값이 동일하게 나타나고 있다. 그리고 k_h 와 K_{AE} 값의 관계는 Seed-Whitman 이론에서는 선형적으로 나타났으나, Seed-Whitman 이론을 제외한 모든 준정적이론에 의한 k_h 와 K_{AE} 의 관계는 다소 비선형적으로 나타났다.

4.3 동적주동토압의 작용점위치

그림 4.3은 기존의 이론과 수정 Mononobe-Okabe 이론에 의하여 계산된 수평 지진가속도계수에 따른 작용점의 위치를 비교한 것이다. 정적인 상태($k_h=0$)에서 Mononobe-Okabe, Seed-Whitman에 의한 작용점 위치는 Coulomb의 가정과 같이 $H/3$ 로 가정하고 있다. 그러나, 수정 Mononobe-Okabe 이론식은 Coulomb의 가정하에서 평면아칭이론을 적용하여 이론식을 유도하였으므로, 작용점은 벽면마찰각 $\delta=0$ 이 아닌 $H/3$ 에 일치하지 않게 된다.

Mononobe-Okabe 이론과 Parakash-Saran 이론에 의한 작용점의 위치는 k_h

의 크기와는 상관없이 일정한 반면에 수정 Mononobe-Okabe 이론, 정성교-백승훈 이론 및 Seed-Whitman 이론에 의하면 k_h 가 증가함에 따라 작용점의 위치가 높아지는 것으로 나타났다. 특히 k_h 가 0.3이상인 경우 Seed-Whitman 이론에 비해서 수정 Mononobe-Okabe 이론식과 정성교-백승훈 이론에 의한 작용점의 위치는 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 실제지진에서는 일어날 가능성이 희박한 조건으로 아칭이론을 도입하고 깊이별 토압을 알 수 있는 수정 Mononobe-Okabe 이론과 정성교-백승훈 이론은 가정에 의한 기존이론의 작용점 위치에 비해 크게 증가하였다.

본 조건에서 수정 Mononobe-Okabe 이론식에 의한 준정적 해석법들에 의한 정적토압의 작용점의 위치는 약 0.36H 이고 수정 Mononobe-Okabe 이론, Seed-Whitman, 정성교-백승훈 이론의 동적토압 작용점의 위치가 H/3보다 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 옹벽설계에 주로 사용하고 있는 Mononobe-Okabe 이론이 전도모멘트에 대한 안전율을 과소평가할 수 있다는 것을 의미한다.

4.4 상 · 하향 연직지진가속도계수에 대한 영향

k_v (연직지진가속도계수)에 의한 영향은 그림 4.4, 4.5, 4.6에 나타내었으며 $k_h=0.2$, $k_v=\pm 0.1$ 을 적용하였다.

$K_{ae}(z)$ 및 K_{AE} 는 상향(+)의 k_v 보다 하향(-)의 k_v 일 때 더 크게 나타났다. 동적토압의 작용점 위치는 상향의 k_v 가 작용할 때 높게 나타났으나, Mononobe-Okabe와 Rankin계 지진토압은 1/3H로 가정하였기 때문에 k_v 영향에 관계없이 일정하다.

4.5 점착력에 대한 영향

그림 4.6은 점착력을 고려한 토압분포를 Prakash-Saran이론과 비교하였다. 점착력이 없을 때와 같이 수정 Mononobe-Okabe 이론은 비선형 분포를 하고, Prakash-Saran이론은 선형분포를 하였다. 그리고 점착력이 있을 때의 토압분포는 인장균열에 의해 옹벽상단에서 부(-)의 값을 가지고 전주동토압의 크기도 작아졌다. 점착력이 클수록 인장균열의 깊이는 더 깊어졌고 토압도 감소하였다.

표 4.1 기존이론 및 수정 Mononobe-Okabe 이론식에 의한 전동적 주
동토압(K_{AE}) 비교

k_h	K_{AE}				
	M(M-O)	M-O	P-S	S-W	C-B
0	0.2461	0.2461	0.2461	0.2461	0.2461
0.1	0.3055	0.3055	0.3055	0.3211	0.2798
0.2	0.3797	0.3797	0.37974	0.3961	0.3759
0.3	0.4743	0.4743	0.4743	0.4711	0.4743
0.4	0.5991	0.5991	0.5991	0.5461	0.5991

※ M(M-O) : 수정 Mononobe-Okabe이론, M-O : Mononobe-Okabe, S-W : Seed-Whitman,
P-S : Prakash-Saran, C-B : 정성교-백승훈

표 4.2 기존이론 및 수정 Mononobe-Okabe 이론식에 의한 작용점의 위
치($\bar{h}$) 비교

k_h	$\bar{h}$				
	M(M-O)	M-O	P-S	S-W	C-B
0	0.3656	1/3	1/3	1/3	0.3892
0.1	0.3701	1/3	1/3	0.3956	0.4350
0.2	0.3890	1/3	1/3	0.4343	0.4350
0.3	0.4423	1/3	1/3	0.4606	0.4631
0.4	0.6280	1/3	1/3	0.4798	0.6329

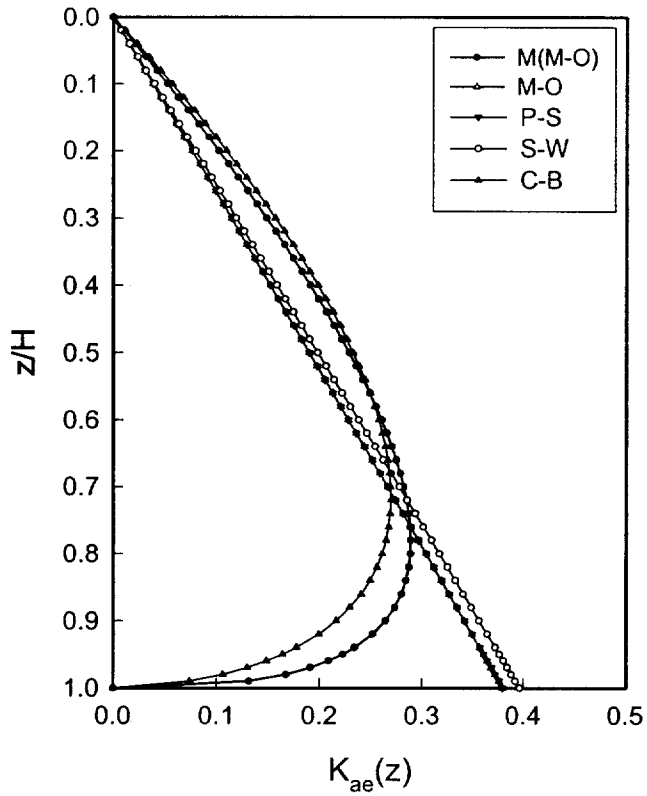


그림 4.1 기존이론과 수정 Mononobe-Okabe
이론식의 동적 주동토압분포($K_{ae}(z)$) 비교

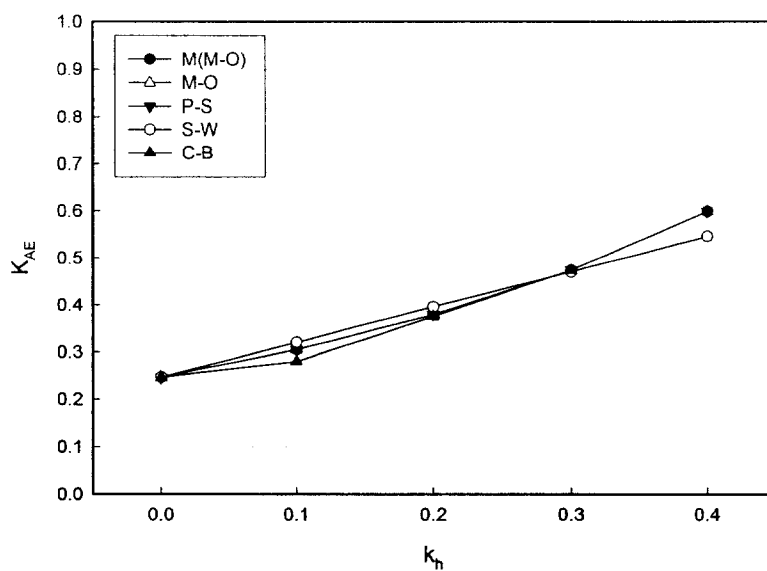


그림 4.2 기존이론과 수정 Mononobe-Okabe이론식의 전동 적주동토압(K_{AE})

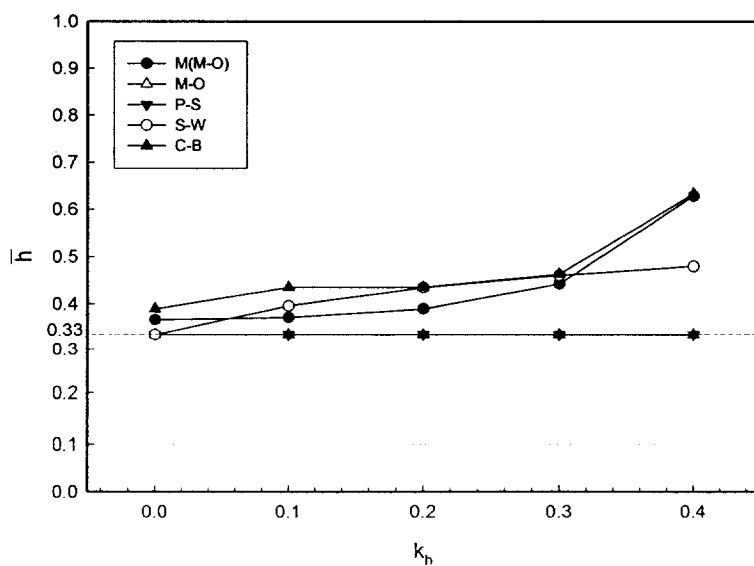


그림 4.3 기존이론과 수정 Mononobe-Okabe 이론식의 작용 점 위치($\bar{h}$)

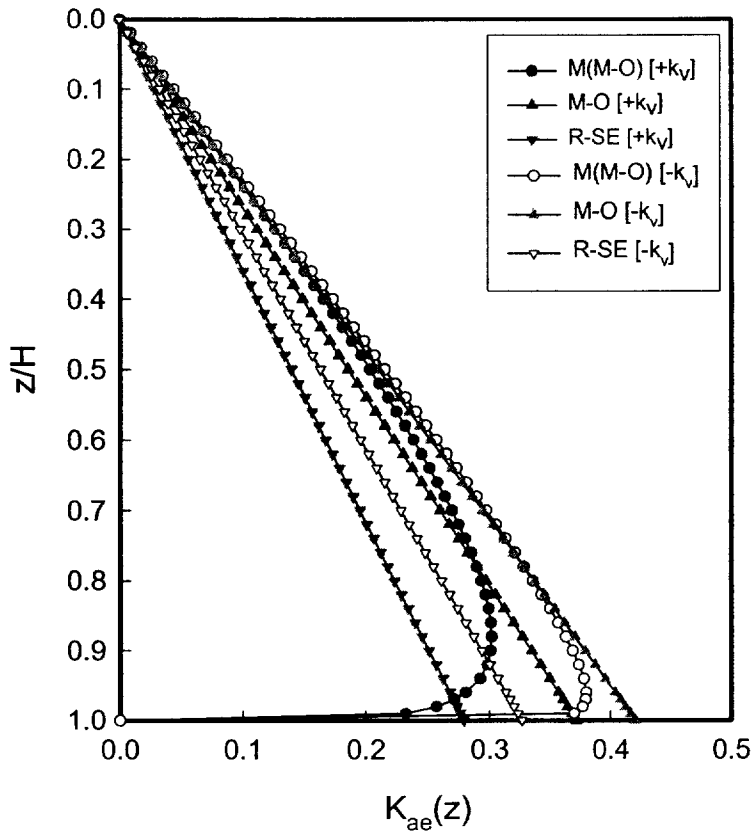


그림 4.4 상 · 하 k_v 에 의한 동적주동토폰분포

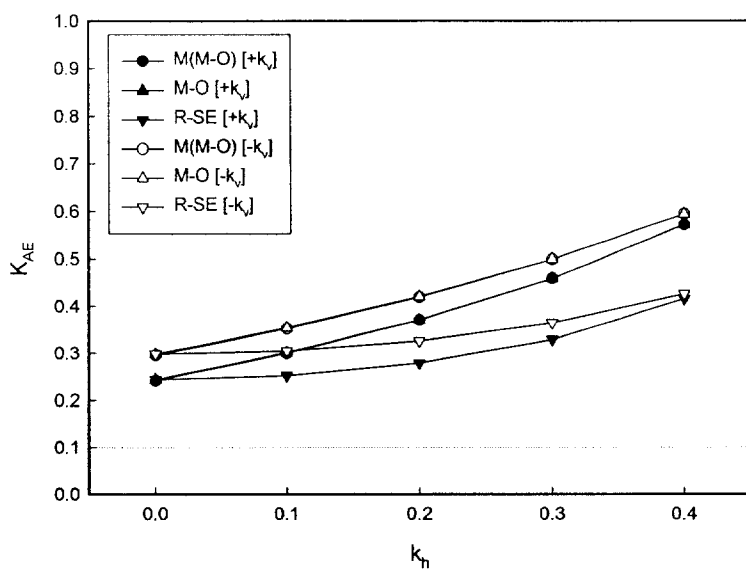


그림 4.5 상 · 하 k_v 에 의한 전동적주동토평

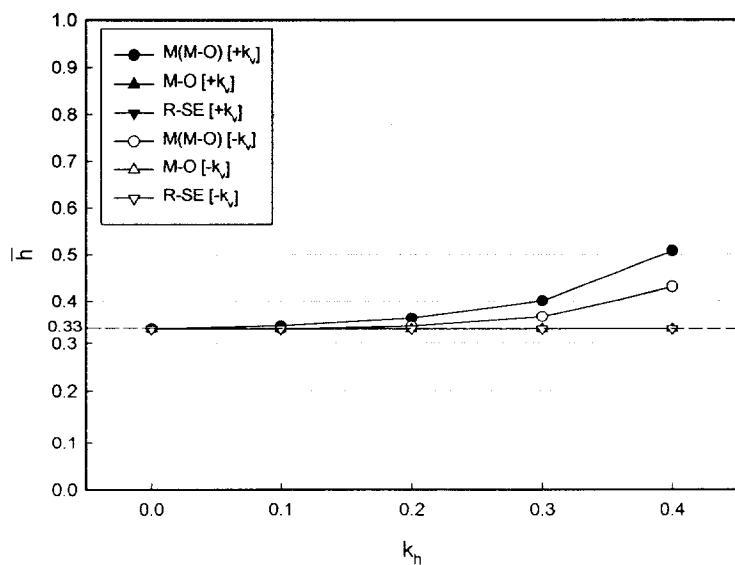


그림 4.6 상 · 하 k_v 에 의한 작용점의 위치

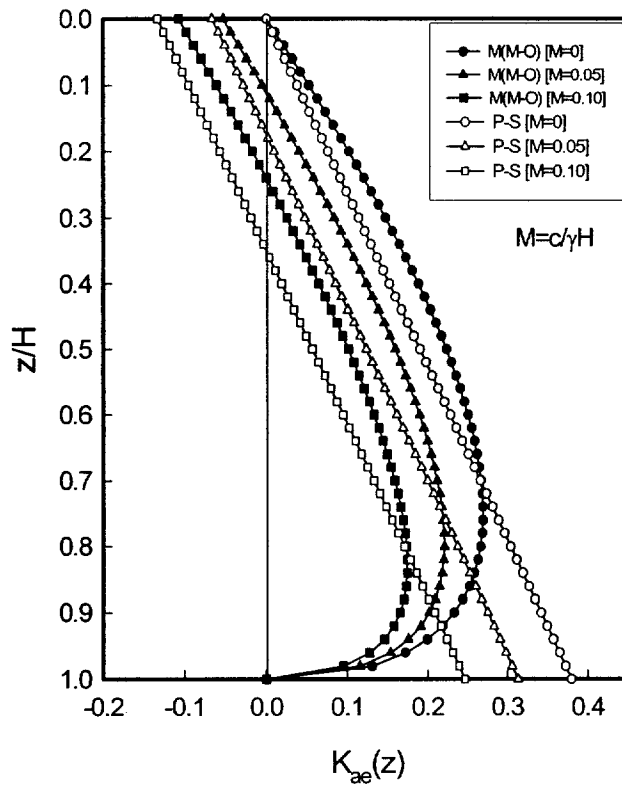


그림 4.7 점착력의 영향에 따른 동적주동토압분포

5. 동적토압의 영향인자 분석

본 장에서는 3장에서 유도된 동적토압이론식에 의하여 계산된 동적토압분포, 전동적 주동토압, 작용점 위치 및 전도 모멘트가 옹벽배면의 경사각 α , 뒷채움면의 경사각 β , 뒷채움흙의 내부마찰각 ϕ 및 벽면마찰각 δ , 그리고 수평지진 가속도계수 k_h 에 따라 어떠한 영향을 나타내는가를 비교·고찰하였다.

본 장의 해석을 위해서 선택된 옹벽의 형상, 뒷채움 흙의 성질 및 동적특성은 $\alpha=90^\circ$, $\beta=0$, $\phi=35^\circ$, $\delta=\phi/2$, $c=0$, $k_h=0.2$, $k_v=0$ 이다. 이 조건에서 검토대상의 영향인자에 대하여 그 영향인자는 변수로 작용한다.

5.1 동적주동토압분포

1) α 및 β 에 따른 영향

그림 5.1은 옹벽배면의 경사각 α 에 따른 동적주동토압 분포를 나타내고 있다. $\alpha=80^\circ$ 일 때 삼각형 분포와 유사한 직선적인 분포에 가까우며, 옹벽배면의 경사가 증가할수록 특히 옹벽하부에서 토압의 크기가 감소하는 비선형 분포를 나타낸다. 이러한 현상은 정성교와 백승훈이 관찰하였던 정적토압에서와 유사한 경향을 보여주었다.

그림 5.2는 뒷채움면의 경사각 β 에 따른 동적주동토압분포를 나타내고 있다. β 가 증가할수록 토압의 크기는 증가하지만, 토압의 양상은 거의 같다는 것을 알 수 있다.

2) ϕ 및 δ 에 따른 영향

그림 5.3은 흙의 내부마찰각 ϕ 에 따른 동적주동토압의 영향을 관찰한 것이다.

ϕ 가 증가할수록 토압의 크기가 감소하는 경향을 나타내며, 토압분포 양상은 크게 변화하지 않음을 알 수 있다.

그림 5.4는 벽면마찰각 δ 의 크기에 따른 동적주동토압 분포를 나타내고 있다. $\delta=0$ 인 마찰이 없는 상태에서는 거의 직선적인 삼각형 분포이나 옹벽 하부쪽에서 오목해지는 특성을 볼 수 있다. $\delta=0$ 인 상태를 기준으로 하여, δ 가 증가할수록 깊이 $0.7H$ 지점의 상부와 하부에서 각각 증가 및 감소하는 비선형 분포를 나타낸다. 그러나 δ 의 변화에 따른 영향은 ϕ 에 따른 영향에 비해 적다는 것을 알 수 있다.

3) k_h 및 k_v 에 따른 영향

그림 5.5는 수평지진가속도계수 k_h 에 따른 동적주동토압 분포를 보여주고 있다. 정적인 상태($k_h=0$)에서 나타난 비선형 토압분포는 k_h 가 증가함에 따라 토압의 크기가 증가하며, 최대토압의 위치가 상승하는 토압분포 양상을 볼 수 있다.

그림 5.6은 연직지진가속도계수 k_v 에 따른 동적주동토압 분포를 나타냈다. 토압분포의 경향은 거의 변함이 없고 k_v 가 증가함에 따라 토압이 조금 감소함을 볼 수 있다.

5.2 전동적주동토압

1) α 및 β 에 따른 영향

그림 5.7은 전동적 주동토압을 옹벽배면의 경사각 α 와 수평지진가속도계수 k_h 에 따라 거의 비례적으로 증가하며, α 가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다.

그림 5.8은 전동적 주동토압(K_{AE})에 대한 뒷채움 경사각 β 에 따른 영향을 나타내고 있다. β 가 증가할수록 K_{AE} 는 조금씩 증가하며, 수평지진가속도계수(k_h)가 증가함에 따라 K_{AE} 는 점차 커짐을 알 수 있다.

2) ϕ 및 δ 에 따른 영향

그림 5.9는 동적주동토압(K_{AE})에 대한 뒷채움 흙의 내부마찰각 ϕ 에 따른 영향을 나타내고 있다. ϕ 가 증가함에 따라 K_{AE} 가 증가하고 k_h 가 클수록 K_{AE} 가 ϕ 에 대해 비례적으로 증가하였다.

그림 5.10은 벽면 마찰각 δ 에 따른 K_{AE} 값을 나타내고 있다. δ 의 변화에 따른 K_{AE} 값의 변화는 비교적 작다는 것을 알 수 있다. 또한 $\delta=0$ 인 경우를 제외하면 K_{AE} 는 벽면마찰의 영향을 거의 무시할 수 있을 것으로 사료된다.

5.3 작용점 위치

1) α 및 β 에 따른 영향

그림 5.11은 전동적 주동토압이 작용하는 위치에 대한 벽체의 배면 경사각 α 의 영향을 비교한 것이다. $k_h=0$ 인 정적인 조건에서 α 가 80° 에서 100° 로 변함에 따라 $\bar{h}$ 는 약 $0.31H$ 에서 $0.42H$ 까지 변하고 있다. $\alpha \geq 90^\circ$ 에서는 $\bar{h}$ 가 $0.33H$ 보다 큰 값을 보이고, $\alpha < 90^\circ$ 에서는 $0.33H$ 보다 작은 값을 나타낸다. 이는 Rankine 과 Coulomb토압이론에서 $\bar{h}=0.33H$ 라는 가정과 상이한 결과라고 사료된다.

그림 5.12는 뒷채움 흙의 경사각 β 의 영향을 나타내고 있다. $\beta=0 \sim 15^\circ$ 에서 $k_h \leq 0.2$ 일 때 β 에 의한 영향은 거의 없지만 $k_h \geq 0.3$ 일 때는 작용점의 위

치가 상승하였다. 이 그림에서 상향 화살표는 값이 크게 증가하여 생략한 것이다.

2) ϕ 및 δ 에 따른 영향

그림 5.13은 뒤채움 흙의 내부마찰각 ϕ 가 토압 작용점의 위치 $\bar{h}$ 에 미치는 영향을 나타내고 있다. $\bar{h}$ 는 ϕ 의 영향을 거의 받지 않고 k_h 의 증가에 비례하여 조금 상승함을 알 수 있다.

그림 5.14는 벽면마찰각 δ 에 따른 $\bar{h}$ 의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 δ 의 변화에 따른 $\bar{h}$ 의 변화는 크게 없었고 $\delta = \phi$ 일 때 작용점의 위치가 상당히 상승함을 볼 수 있다.

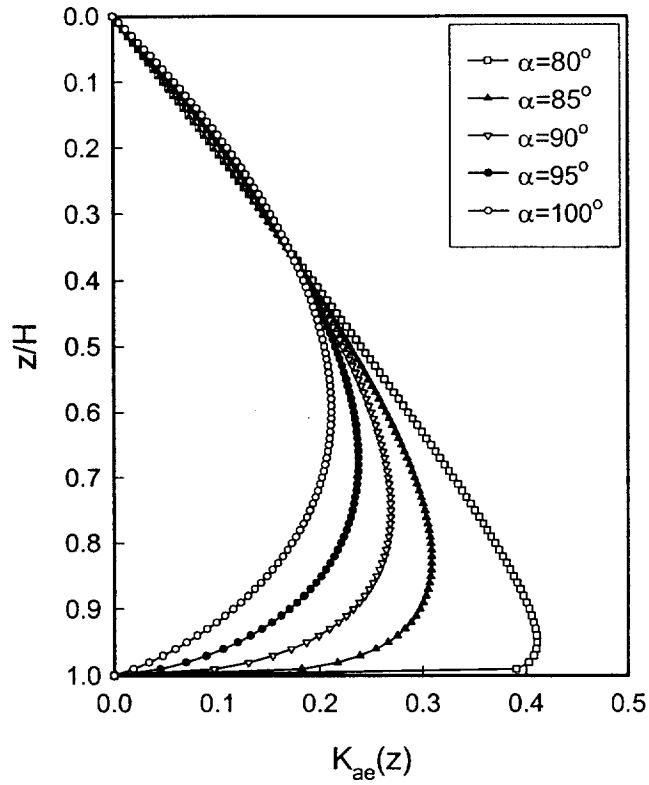


그림 5.1 벽체배면의 경사각 α 의 변화에 따른
동적주동토압분포

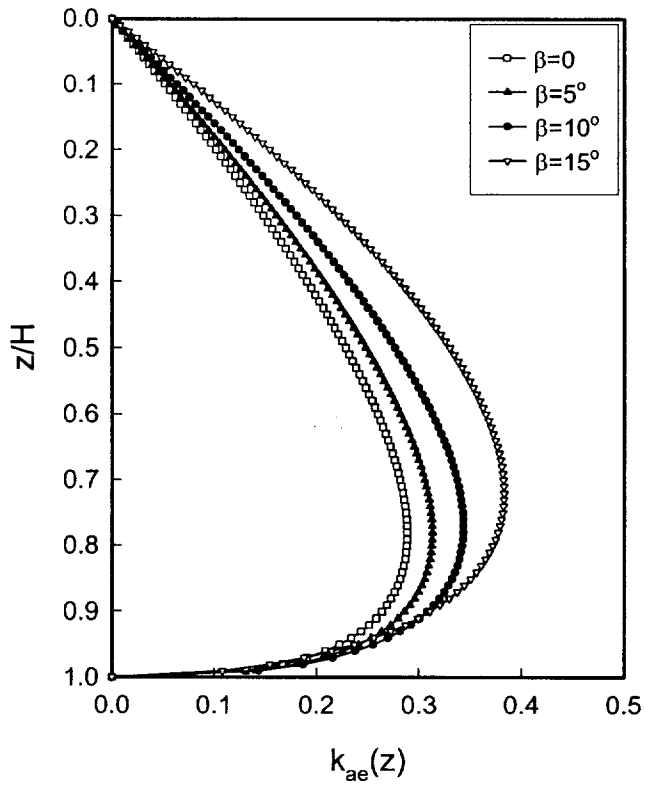


그림 5.2 뒤채움 성토면의 경사각 β 의 변화에 따른 동적주동토압분포

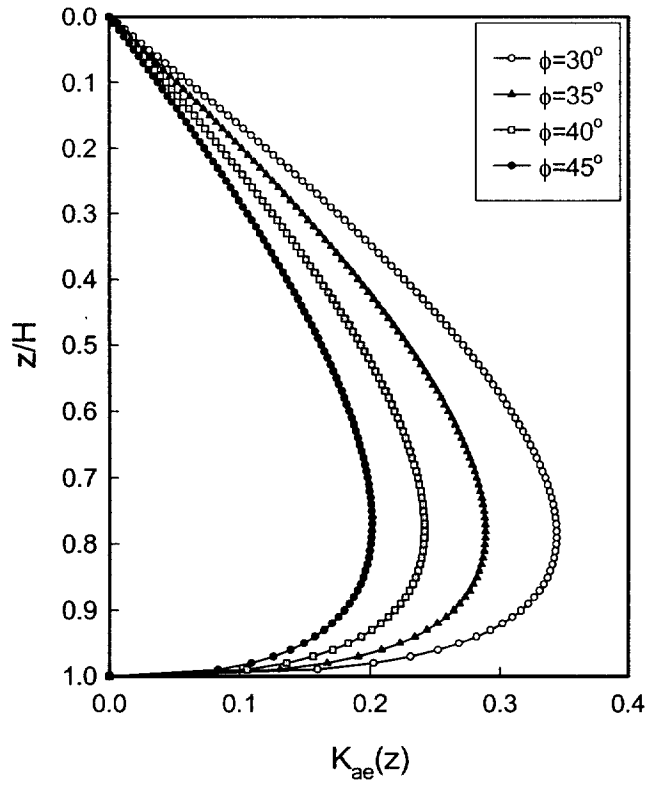


그림 5.3 내부마찰각 ϕ 의 변화에 따른
동적주동토압분포

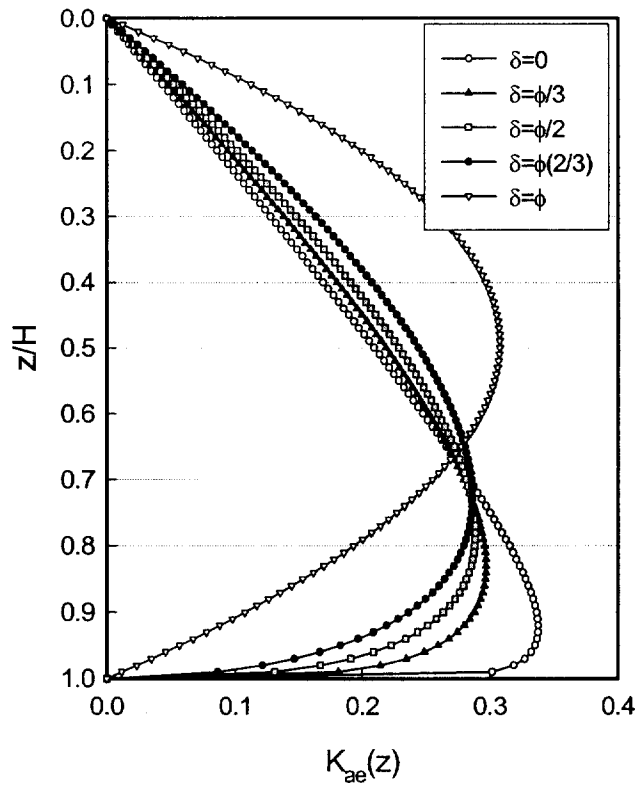


그림 5.4 벽면의 마찰각 δ 의 변화에 따른
동적주동토압분포

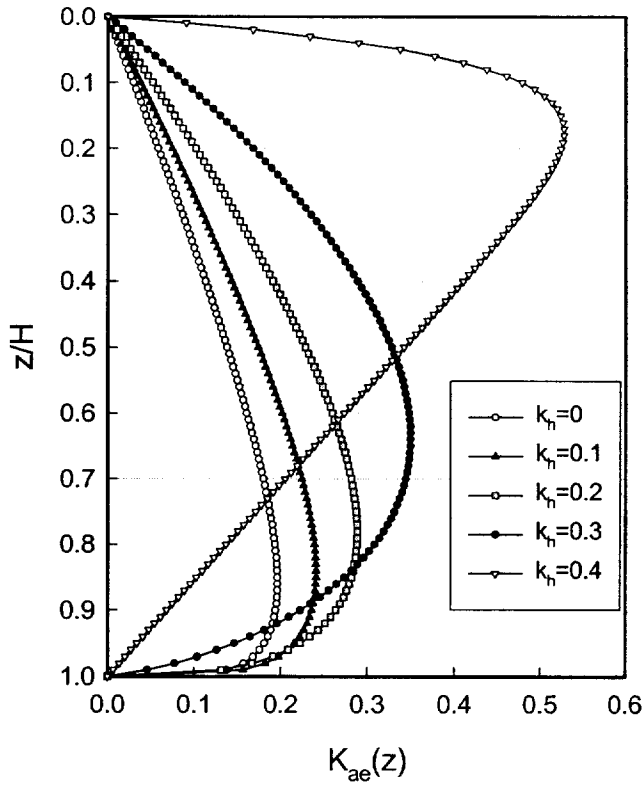


그림 5.5 수평지진가속도계수 k_h 의 변화에 따른
동적주동토폰분포

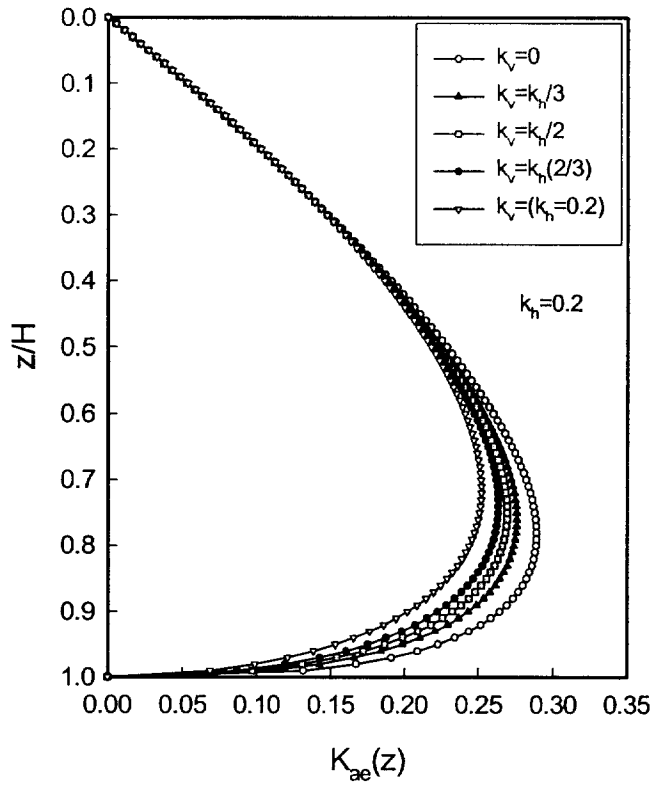


그림 5.6 연직지진가속도계수 k_v 의 변화에 따른
동적주동토압분포

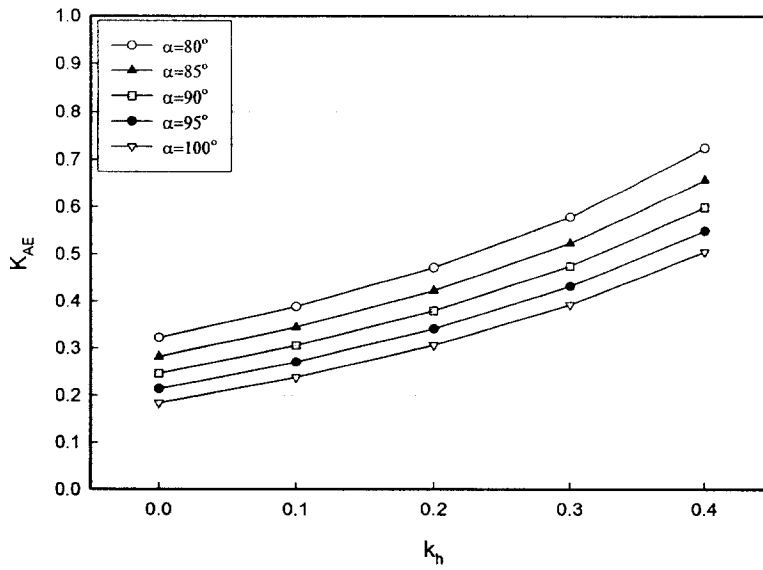


그림 5.7 α 의 변화에 따른 전동적주동토포

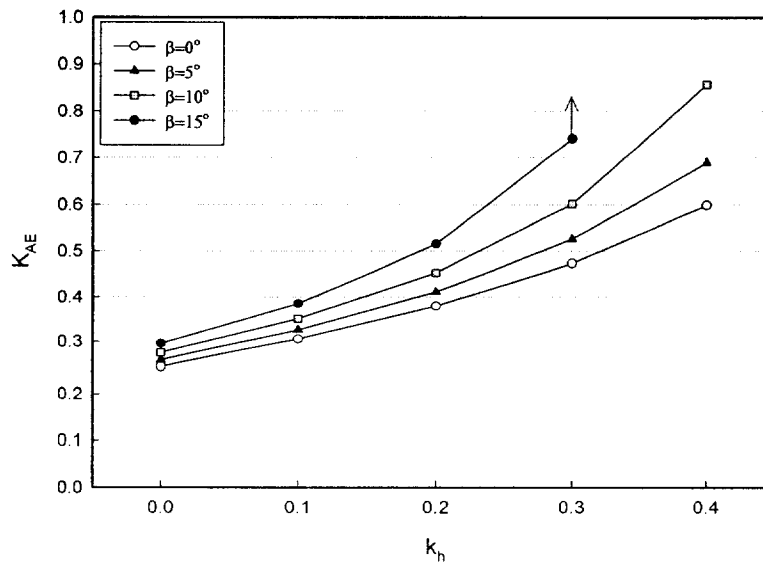


그림 5.8 β 의 변화에 따른 전동적주동토포

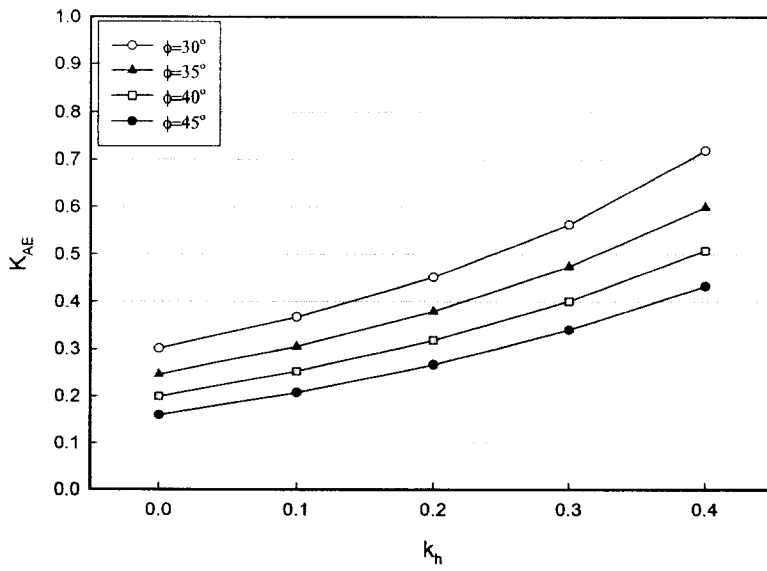


그림 5.9 ϕ 의 변화에 따른 전동적주동토포

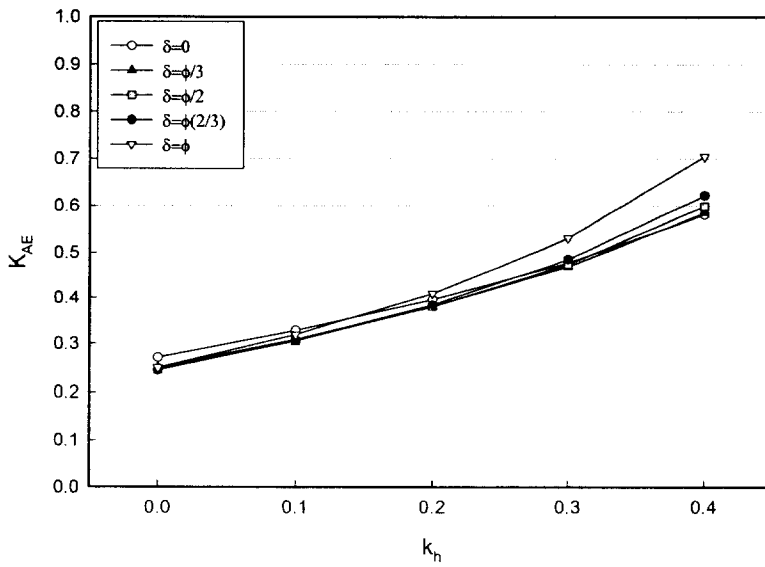


그림 5.10 δ 의 변화에 따른 전동적주동토포

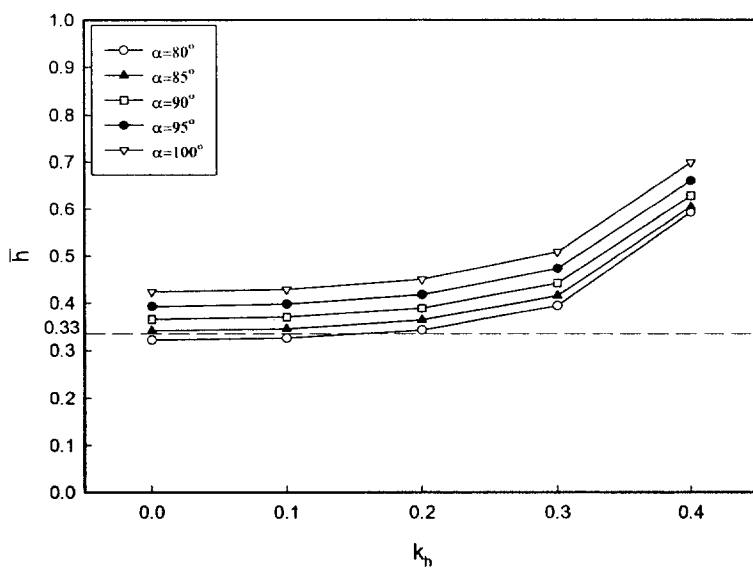


그림 5.11 α 의 변화에 따른 작용점위치

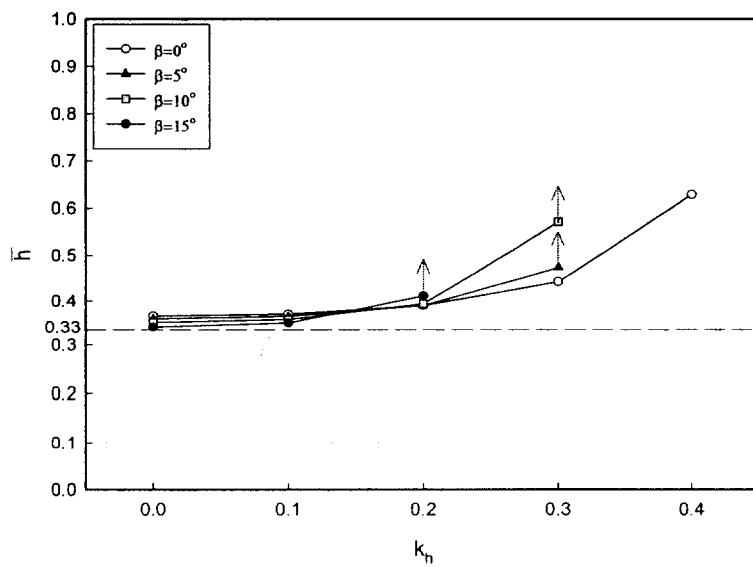


그림 5.12 β 의 변화에 따른 작용점 위치

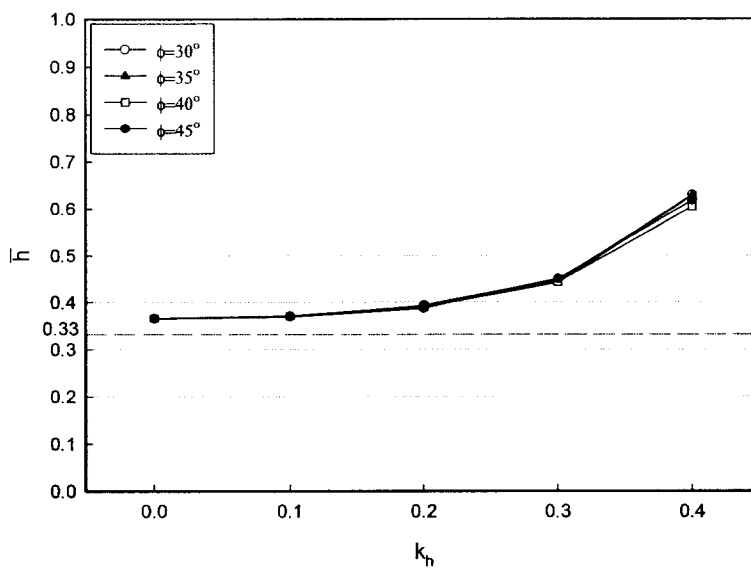


그림 5.13 ϕ 의 변화에 따른 작용점 위치

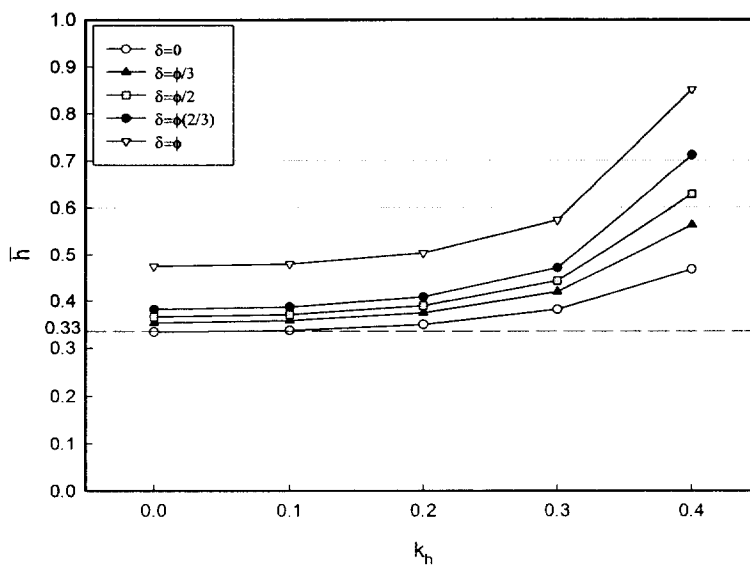


그림 5.14 δ 의 변화에 따른 작용점위치

6. 결론

강성옹벽에 작용하는 동적토압을 구하기 위하여 Coulomb 토압이론의 기본가정인 흙쇄기에 의한 평형조건과 평면아취개념을 도입하여 기존 이론식 M-O이론을 토대로 수정·보완하여 새로운 동적토압 이론(수정 Mononobe-Okabe 이론)식을 제안하였다. 본 연구에서 제한한 토압이론식은 뒷채움 매질이 전파되는 전단파의 속도가 무한대(강성체와 동일한 상태)인 준정적해석으로 유도되었다. 새로이 제안된 동적토압 이론식과 기존의 이론식을 비교·분석하고 수정 Mononobe-Okabe 이론식의 영향인자를 분석한 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존 이론과의 비교에서 토압분포는 기존의 이론에서처럼 깊이에 따라 직선적으로 증가하는 선형 분포가 아닌 비선형분포를 하였고, 전동적주동토압은 기존의 이론과 거의 일치하였으며 k_h 가 증가함에 따라 크게 나타났다. 그리고 전 동적 주동토압의 작용점 위치는 일반적으로 가정하고 있는 $H/3$ 보다 높게 나타났다.
- 2) 영향인자별 분석을 수행한 결과 동적주동토압 분포에서 δ 와 k_v 의 영향은 적었으며, β 와 k_h 가 함에 따라 토압비가 크게 나타나고 α 와 ϕ 의 증가는 토압비를 감소시켰다.
- 3) 전동적 주동토압에서 δ 의 영향은 거의 없었으며, α 와 ϕ 가 증가함에 따라 전 토압은 감소하였다. 그리고 β 가 증가에 따라서는 다소 감소하였다.
- 4) 주동토압의 작용점에서 β 와 ϕ 의 영향은 미세하고 α 와 δ 의 증가에 따라 작용점이 조금 상승하였다.
- 5) 점착력을 적용했을때 토압분포형상은 다르나 토압의 크기는 기존이론과 비슷하게 나타났다.

참고문헌

1. 김소구(1987), 지진학, 박연사, pp. 3-16.
2. 백승훈.(1991), “경사진 중력식 옹벽의 정적 및 동적주동토압”, 동아대학교 석사학위 논문, 1991, pp. 44.
3. 이만렬 et al.(1993), “동적하중을 고려한 주동토압”, 대한토목학회 학술개요집(I), pp. 449-452.
4. 정성교 et al.(1992), “중력식 옹벽에 작용하는 주동토압”, 대한토목학회 학술개요집(I), pp. 571-574.
5. 정성교 · 백승훈(1993), “비점성토로 뒷채움한 강성옹벽에 작용하는 정적토압”, 한국지반공학회지, 제9권, 제1호, pp. 69-75.
6. 정성교 et al.(1993), “점성토로 뒷채움한 강성옹벽에 작용하는 수평토압”, 대한토목학회 학술발표회 개요집(I), pp. 453-456.
7. 허대영.(1993), “점성토로 뒷채움한 강성옹벽에 작용하는 수평토압”, 동아대학교 석사학위논문, pp. 93.
8. Bowles, J.E.(1996), Foundation Analysis and Design, 5ed, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, pp. 640-646.
9. Clayton, C.R.I., Militisky, J., and Woods, R.I.(1986), Earth Pressure and Earth-Retaining Structures, 2ed, Blackie Academic & Professional, pp. 398.
10. Coulomb, C.A(1776)., "Essai sur une application des regles maximis et minimis a guelgue problems de statigue realifs al" architecture, Mem. acad. roy. pres. diverssavants, Vol. 7
11. Craig, R.F.(1983), Soil Mechanics, 3rd ed., Van nostrand Reinhold Co. Ltd., pp. 185-207.

12. Das, B.M.(1983), Fundamentals of Soil Dynamics, Elsevier Science Publishing Co., Inc., pp. 301-327.
13. Das, B.M.(1984), Principles of Foundation Engineering, Brooks/Cole Engineering Division, U.S.A, pp. 213-236.
14. Das, B.M.(1985), Principles of Geotechnical Engineering, PWS, U.S.A., pp. 295-339.
15. Das, B.M.(1987), Theoretical Foundation Engineering, Elsevier, pp. 440.
16. Das, B.M.(1993), Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Co., pp. 328-368.
17. Fang, H.Y.(1991), Foundation Engineering Hand book, 2nd ed. and 3rd ed., Van Nostrand Reinhold, U.S.A., pp. 224-228.
18. Handy, R.L.(1985), "The Arch in Soil Arching", Journal. of Geotechnical Engineering. ASCE, Vol. III, No. 3, pp. 302-318.
19. Housner, G.W.(1974), Strong Ground Motion. In: R.L. Wiegel(Editor), Earthquake Engineering, Prentice-Hall, New York, NY, pp. 75-91.
20. Kingsley, O. Harrop-Williams.(1989), "Geostatic Wall Pressures", ASCE, Vol. 115, No. 9, pp. 1321-1326.
21. Lambe, T.W., and Whitman, R.V.(1979), Soil Mechanics, SI version, John Wiley & Sons, pp. 553.
22. Lee, I.K., and Herington, J.R.(1972), "A Theoretical Study of the Pressure Acting on a Rigid Wall, by a Sloping Earth or Rockfill", Geotechnique, Vol. 22, No. 1. pp. 1-26.
23. Mononobe, H.(1929), "Earthquake Proof Construction of Masonary Dams", Proc, World Engineering Congress, Vol. 9, pp. 275.
24. Okabe, S.(1924), "General Theory on Earth Pressure and Seismic

- Stability of Retaining Walls and Dams", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol. 6.
25. Okabe, S.(1926), "General Theory of Earth Pressures", Journal of, Japanese Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, Vol. 12, No. 1.
 26. Okamoto, S.(1984), Introduction to Earthquake Engineering, 2ed., University of Tokyo Press, pp. 252-259.
 27. Prakash. S., and Saran, S.(1966), "Static and Dynamic Earth Pressures Behind Retaining Walls", Proceeding, Third Symposium on Earthquake Engineering, Rookee, Vol. 1, pp. 277-288.
 28. Prakash, S.(1981), Soil Dynamics, McGraw Hill Book Co., New York, NY, pp. 128-170.
 29. Richards, R., and Elms. D.G.(1979), "Seismic Behaviour of Gravity Retaining Walls", Journal. of Geotechnical. Engineering., ASCE, No. GT4, pp. 449-469.
 30. Saran, S., and Prakash. S.(1968), "Dimensionless Parameters for Static and Dynamic Earth Pressures for Retaining Walls," Indian Geotech. Journal., Vol. 7, No. 3, pp. 295-310
 31. Seed, H.B. and Whitman, R.V.(1970), "Design of Earth Retaining Structures for Dynamics Loads", Proc. ASCE Speciality Conference on Laterral Stress in the Ground and Design of Earth Retaining Structures, Ithaca, NY, pp. 103-147.
 32. Terzaghi, K., and Peek, R.B.(1967), Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd, John Wiley & Sons, New York.

감사의 글

조용한 밤 온온한 불빛아래 지난 연구실 생활을 돌이켜 봅니다. 어렵고 힘들었던 하지만 많은 즐거움들이 함께 했던 추억에 젖기도 하고 2년 간의 생활 속에서 부진했던, 소홀했던 점들을 반성하며 고마운 분들께 감사의 마음을 전할까 합니다.

저에게 대학원의 길을 걷게 해주시고 지반공학이라는 학문을 접하게 해주신 정두희 교수님. 형님 같이 아버지 같이 아낌없는 사랑을 주시고 인생의 선배로 스승으로 충고와 격려를 아끼지 않으셨던 교수님께 진심으로 감사 드립니다. 그리고 바쁘신 중에도 미약한 논문을 심사 해주시고 격려해 주신 정진호 교수님과 이환우 교수님께 깊은 감사를 드리며 제자들이 토목인 으로서 모자람이 없도록 학문정진에 힘쓰시는 토목공학과 교수님들께 감사의 마음을 전합니다.

소중한 연구실 생활에서 항상 가족 같이 지낸 준영 형, 용준 형, 유돈 형, 사회인이 되어 더욱 열심히 경욱 형, 중철 형, 중태 형, 태완씨, 동기로서 서로위지하며 기쁨과 즐거움을 함께 한 태호, 도희, 준규, 연구실을 더욱더 발전시킬 재관, 도형, 대식, 홍일점 형은, 그리고 후배들을 사랑해주시는 지반공학연구회 선배님들께 감사 드립니다.

학교 일로 소홀했지만 언제나 반겨주고 격려해준 나의 벗 유지, 성희, 재만, 부식, 현호, 동준, 진현, 문기, 상혁, 오진, ..., 학부동기들, 그리고 학부동기로 대학원을 같이 진학하여 힘이 되어준 순호, 진우 등 모든 친구들에게 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

바쁘신 중에도 조카를 위해 학문적으로나 정신적으로 힘이 되어주신 막내 고모부, 항상 밝은 얼굴로 반겨주는 경근이, 고모님들, 아낌없는 사랑과 격려를 해주신 작은아버지, 작은 어머니, 동생 성주, 선영, 그리고 항상 반겨주시고 걱정해주시는 외숙부, 외숙모님께 감사의 마음을 전합니다.

언제나 당신들 건강보다는 아들 잘되기만 바라시고 헌신적인 사랑으로 든든한 힘이 되어 주신 부모님, 자랑스런 동생 진철, 그리고 손자 잘되라며 매일매일 기도하시는 할머니께 이 논문을 바칩니다. 아버지, 어머니 정말 감사합니다. 건강하세요.

박 태 판