

零膨脹線理論에 의한 動的土壓解析

Analysis of Dynamic Earth Pressure Based on Zero Extension Line Theory

申東勳* · 黃正奎**

Shin, Dong Hoon · Hwang, Jung Kyu

Abstract

The present study was made based on the zero extension line theory and the well-known Mononobe-Okabe's to determine the dynamic earth pressures acting on the retaining walls. The zero extension line theory, which was proposed by Roscoe *et al.*, assumes the coincidence between the loci of failure and the zero extension lines in soil mass. In order to compute the dynamic earth pressure developed by an earthquake, it was assumed that for the vertical retaining walls with no surcharge, the backfill materials are dense and cohesionless sandy soils, there are no changes in soil parameters during earthquake, and the horizontal earthquake intensity is considered. The effects of horizontal earthquake intensity, internal friction angle of soil, wall friction angle and dilation angle, on the earth pressure coefficients were analysed. Finally, the presented theories were successfully compared with the Mononobe-Okabe's as well.

요 지

본 연구에서는 토체내에 발생하는 破壞面의 方向은 線形變形率增分이 0인 零膨脹線의 方向과 일치한다고 하는 Roscoe의 零膨脹線理論과 Mononobe-Okabe의 動的 土壓理論을 應用하여 地震의 影響을 고려한 動的土壓理論式을 제안하였다. 동적토압식을 유도함에 있어서 벽체는 연직이고 載荷重이 없으며, 뒷채움면은 수평면이고 그 재료는 조밀한 非粘着性 砂質土로서 지진시에도 土質定數는 변화되지 않는 것으로 가정하였으며, 지진에 의한 영향을 고려하기 위하여 水平方向震度만을 고려하였다. 한편, 제안된 토압식에 포함되어 있는 水平震度, 흙의 内部摩擦角, 壁摩擦角 및 다이레이션角의 영향을 분석하였으며, 유도된 이론식을 Mononobe-Okabe의 토압식과 비교분석하였다.

1. 서 론

지금까지 발표된 土壓理論은 極限平衡法에 의한 Coulomb계의 土壓論과 塑性理論에 의한 Rankine계의 土壓論, 그리고 벽체의 變位 또는 흙의 變形을

고려한 土壓論으로 분류된다.⁽¹⁶⁾ 이들 土壓理論은 모두 토체내에서의 응력의 변화를 다룬 것으로서, 토체의 破壞는 그 내부에서 剪斷應力과 法線應力の 比 (τ/σ)가 최대가 되는 면을 따라서 일어난다는 가정에 근거를 두고 있다.

한편, Roscoe 등⁽⁹⁾은 많은 실험결과를 토대로 토체내에 발생하는 破壞面의 方向은 線形變形率增分이

* 정회원 · 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정

** 정회원 · 홍익대학교 공과대학 토목공학과 부교수

0인 零膨脹線(zero extension line)의 方向과 일치함을 밝혔으며, James & Bransby^(4,5)는 Roscoe 등의 연구결과를 토대로 하여 수동토압을 추정하기 위한 單純零膨脹線場(simple zero extension line fields)을 제안하고 실험결과와 잘 일치함을 보였다. 그 후 Sabzebari & Ghahramani⁽¹¹⁾는 James와 Bransby가 제안한 단순영팽창선장을 이용하여 벽체가 鉛直이며, 뒷채움경사가 없는 경우의 토압이론식을 제안한 바 있다.

그러나 영팽창선이론에 근거하여 제안된 토압이론식은 모두 靜的인 경우로 국한되어 있어 地震에 의한 영향이 고려되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 Sabzebari와 Ghahramani의 土壓理論과 Mononobe-Okabe의 動的土壓理論^(6,7)을 응용하여 零膨脹線理論에 바탕을 둔 動的土壓理論式을 제안하였다.

2. 零膨脹線理論

2.1 零膨脹線의 概念

零膨脹線이란 線形變形率增분이 0인 線으로서 물체내에 변형이 발생할 때 伸長 또는 壓縮이 일어나지 않는 선을 말하고, 이들 영팽창선들로 이루어진 領域을 零膨脹線場이라 부른다.^(3,9-11) 이 때 零膨脹線의 方向은 그림 1과 같은 變形率 Mohr圓을 이용하여 그 방향을 결정할 수 있다.

그림 1에서 A 및 B점의 선형변형률증분은 $\delta\epsilon = 0$ 이고, 점 P_p 를 변형률 Mohr원의 平面基点이라고 할 때 P_pA 및 P_pB 는 零膨脹線方向을 나타내며, ν 는 다이레이션角(dilation angle)으로서 壓縮變形率과 體積의 減少를 (+)라 할 때, 다음과 같이 정의된다.

$$\sin \nu = -\frac{\Delta V/V}{d\gamma_{\max}} = \frac{-(\delta\epsilon_1 + \delta\epsilon_3)}{(\delta\epsilon_1 - \delta\epsilon_3)} \quad (1)$$

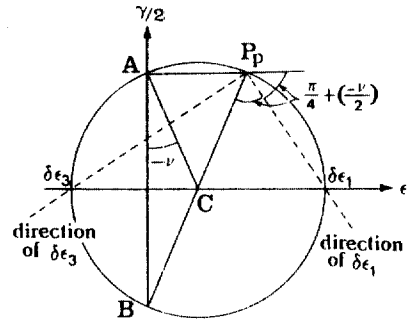
여기서, $\delta V/V$: 體積變化率

$d\gamma_{\max}$: 最大剪斷變形率의 增分

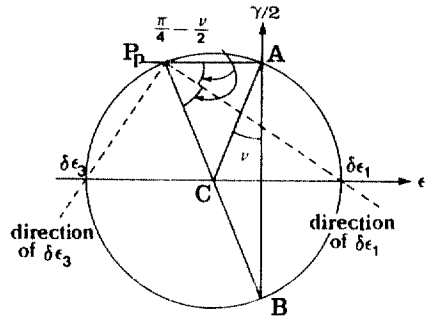
$\delta\epsilon_1$: 最大主變形率의 增分

$\delta\epsilon_3$: 最小主變形率의 增分

그림 2는 P_pA 가 수평이라고 할 때 그에 해당되는 미소 要素를 나타낸 것으로서 각 邊은 영팽창선에 해당된다. 한편 Roscoe 등에 의하면, 흙이 均質하고 等方性일 때는 $\delta\epsilon_1$ 방향과 $\delta\sigma_1$ 방향이 일치하는 同



(a) 느슨한 모래



(b) 조밀한 모래

그림 1 변형률에 관한 Mohr원

軸性(co-axiality)이 성립된다고 한다.⁽⁹⁾ 따라서 그림 1 및 2에 해당되는 應力 Mohr圓은 그림 3과 같다. 한편, 그림 3에서 ΔOAC 에 sine법칙을 적용하면

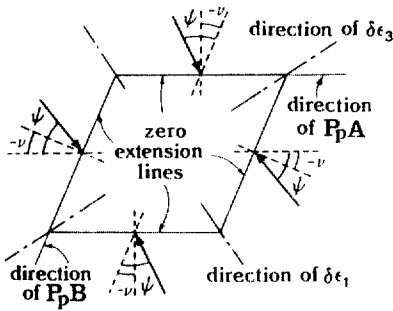
$$\frac{t}{\cos \nu} = \frac{q}{\sin(\nu + \psi)} = \frac{p}{\cos \psi} = 2R$$

$$\therefore \frac{q}{p} = \frac{\sin(\nu + \psi)}{\cos \psi} \quad (2)$$

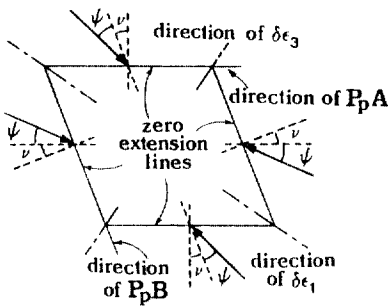
여기서, t : 임의의 영팽창선에 작용하는 단위길 이당 마찰력의 합력 (=traction)
 ψ : 어느 한 영팽창선에 작용하는 t 의 방향과 나머지 다른 한 영팽창선 방향의 사이각

$$p : \frac{(\delta_1 + \delta_3)}{2}, \quad q : \frac{(\delta_1 - \delta_3)}{2}$$

R : ΔOAC 에 외접하는 원의 반경
또한 ΔODC , ΔOAC 및 식 (2)로부터

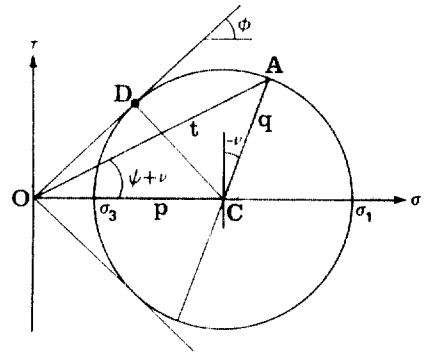


(a) 느슨한 모래

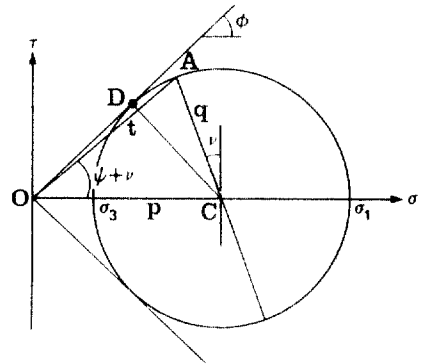


(b) 조밀한 모래

그림 2 그림 1에 해당하는 미소요소



(a) 느슨한 모래



(b) 조밀한 모래

그림 3. 응력에 관한 Mohr원

$$\begin{aligned} \sin\phi &= \frac{CD}{OC} = \frac{CA}{OC} = \frac{q}{p} = \frac{\sin(\nu + \psi)}{\cos\psi} \\ &= \sin\nu + \cos\nu \cdot \tan\psi \\ \therefore \tan\psi &= \frac{\sin\phi - \sin\nu}{\cos\nu} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, ϕ : 흙의 내부마찰각

2.2 破壊曲面の 形狀

(1) 破壊曲面の 構成

본 논문에서는 토압에 의한 파괴면의 형상을 Sabzebari와 Gharhamani^(10,11) 및 James와 Bransby⁽⁵⁾의 제안에 따랐다. 즉, 뒷채움 재료로 사용된 흙은 조밀한 비점착성 사질토로서 剪斷應力을 받을 때 ν 의 크기로 膨脹하고, 이 때 ν 와 ψ 는 全塑性領域에 걸쳐서 일정하며, 破壊曲面은 뒷채움의 지표면에 근접하는 Rankine領域(또는 Cauchy領域), 벽체에 근접하는 混合領域, 그리고 Rankine領域과 혼합영역

사이에 있는 Goursat領域의 세 영역으로 구성되는 것으로 가정하였다. 그림 4는 벽체가 연직이고 뒷채움의 지표면이 수평인 경우에 대한 最外郭의 破壊面을 나타낸 것으로서, 이 때 파괴곡면은 Cauchy영역에서 직선, Goursat영역에서 對數螺線, 혼합영역에서 직선으로 표시되며, 대수나선식은

$$r = r_0 \cdot e^{\tan\psi \cdot \theta} \quad (4)$$

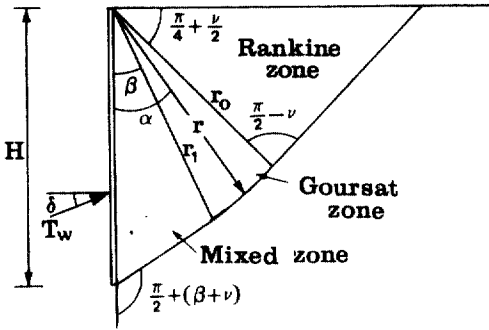
여기서,

r 및 r_0 : 각각 대수나선의 임의 반경 및 초기반경

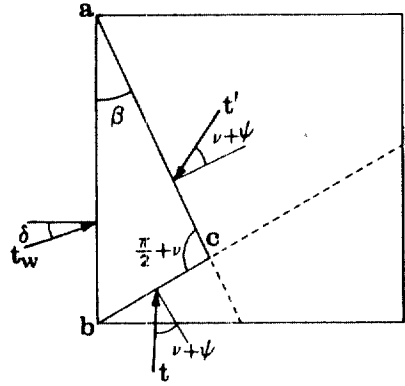
θ : 대수나선반경 r_0 과 r 사이의 각

(2) β 의 決定

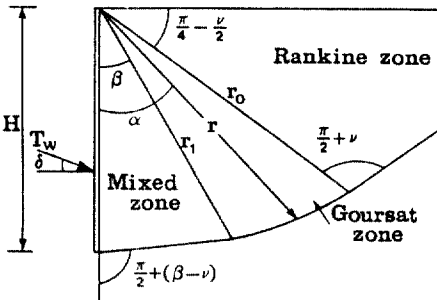
그림 4에서 β 는 벽체의 배면과 혼합영역의 경계선 사이의 각으로서 벽체에 근접하는 미소 흙요소에 대한 응력의 Mohr원을 이용하여 결정할 수 있다.



(a) 주동상태

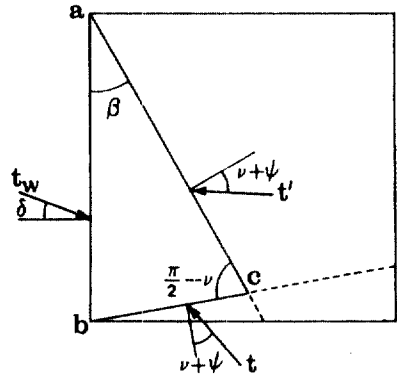


(a) 주동상태



(b) 수동상태

그림 4. 영팽창선장



(b) 수동상태

즉, 벽체에 근접하는 혼합영역내의 미소요소에 작용하는 힘은 그림 5와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 t 및 t' 는 각각 임의의 영팽창선에 작용하는 단위길이당 마찰력의 합력이고, t_w 는 벽체에 작용하는 토압의 크기이며, δ 는 壁體의 摩擦角이다.

그림 6은 그림 5의 흙요소에 작용하는 응력을 Mohr 원상에 도시한 것이다. 그림 6에서 $\triangle OBC$ 에 sine 법칙을 적용하면

$$\frac{p}{\sin(\xi \pm \delta)} = \frac{q}{\sin \delta} \quad (5)$$

$$\therefore \delta = \mp \delta + \sin^{-1} \left(\frac{p}{q} \cdot \sin \delta \right)$$

식 (5) 이하의 복합부호는 차례대로 주동상태와 수동상태를 나타낸다. 그림 6의 기하학적 관계와 식 (2)로부터

$$\xi + 2\beta = \frac{\pi}{4} \mp \nu \quad (6)$$

그림 5. 혼합영역내에 있는 흙요소에 작용하는 힘

$$\therefore \beta = \frac{\pi}{4} \mp \frac{\nu}{2} \pm \frac{\delta}{2} - \frac{1}{2} \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin \delta \cdot \cos \psi}{\sin(\psi + \nu)} \right\}$$

(3) r 과 H 의 關係

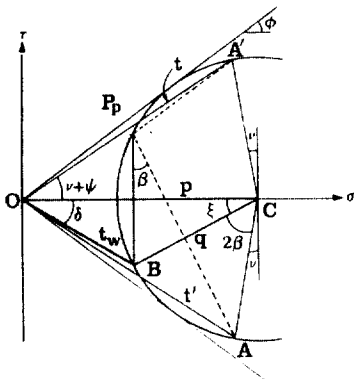
파괴곡면의 형상 및 크기를 나타내는 r 과 H 는 그림 4에서 각 영역의 기하학적인 관계와 식 (6)으로부터

$$\left. \begin{aligned} \frac{r_1}{H} &= \frac{\cos(\beta \pm \nu)}{\cos \psi}, \quad \frac{r}{r_1} = e^{\mp \tan \nu \cdot (\alpha - \beta)}, \\ \frac{r_0}{r_1} &= e^{\mp \tan \nu \cdot (\pi/4 \mp \nu/2 - \beta)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

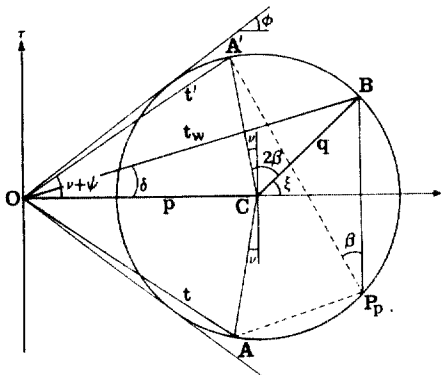
여기서,

r_0 , r 및 r_1 : 각각 Goursat 영역내에서 대수나선의 초기반경, 임의반경 및 최종반경

H : 옹벽의 높이



(a) 주동상태



(b) 수동상태

그림 6. 응력의 Mohr원

3. 動的土壓理論式의 提案

3.1 基本假定

본 논문에서는 벽체에 작용하는 動的土壓을 구하기 위하여 다음과 같은 기본가정을 설정하였다.

- (1) 응력과 변형률관계는 平面變形率 條件에 따른다.
- (2) 뒷채움흙은 均質하고 等方性인 조밀한 非粘着性 흙이다.
- (3) 벽체는 鉛直이고 剛性이다.
- (4) 過載荷重은 작용하지 않는다.
- (5) ν, δ 및 ψ 는 소성영역 전체에 걸쳐서 一定하다.
- (6) 地震時 破壞흙쇄기의 形狀 및 크기는 靜的인 경우와 同一하다.
- (7) 地震의 영향은 水平方向震度 k_h 만을 고려한다.

여기서 地震荷重은 대개의 경우 매우 짧은 시간 동안 작용하고 반복되는 것이 아니므로 ν, δ 및 ψ 는 靜的인 경우와 같다고 볼 수 있다.⁽²⁾ 따라서 식 (6)과 (7)로부터 地震時 破壞흙쇄기의 形狀과 크기를 同一한 것으로 간주할 수 있다.

또한 地震의 영향을 고려한 動的土壓解析에는 일반적으로 鉛直方向震度 k_v 가 무시되는 관계에 따라,^(8,16) 본 논문에서는 水平方向震度 k_h 만을 고려하였으며, k_h 와 k_v 는 각각

$$k_v = \frac{\alpha_v}{g}, \quad k_h = \frac{\alpha_h}{g} \quad (8)$$

여기서,

α_v 및 α_h : 각각 地震加速度的 鉛直成分 및 水平成分,

g : 重力加速度

3.2 세 영역에 작용하는 힘의 平衡關係

(1) Rankine領域 그림 7에서 Rankine영역내에 있는 흙쇄기에 작용하는 힘의 평형관계로부터 T_0' 를 소거하여 정리하면,

$$T_0 \cdot \cos(\nu + 2\psi) - W_0 \cdot \sin(\pi/4 \mp \nu/2 - \psi) \mp k_h \cdot W_0 \cdot \cos(\pi/4 \mp \nu/2 \mp \psi) = 0 \quad (9)$$

여기서, $W_0 = \frac{1}{2} \gamma \cdot r_0^2 \cdot \cos \nu$

W_0 : 흙쇄기의 무게

γ : 흙의 단위중량

(2) 混合領域

그림 8에서 혼합영역내에 있는 토체에 작용하는 힘의 평형관계로부터 T_b 를 소거하여 정리하면,

$$T_w \cdot \cos(\beta \mp \psi \mp \delta) - T_1 \cos(\nu + 2\psi) - W_1 \cdot \sin(\beta \mp \psi) \mp k_h \cdot W_1 \cdot \cos(\beta \mp \psi) = 0 \quad (10)$$

여기서, $W_1 = \frac{1}{2} \gamma \cdot H \cdot r_1 \cdot \sin \beta$

T_w 및 T_b : 각각 벽체 및 파괴저면에 작용하는 힘

(3) Goursat領域

그림 9에서 Goursat영역내의 미소요소에 작용하는 힘의 평형관계로부터 dT_b 를 소거하여 정리하면,

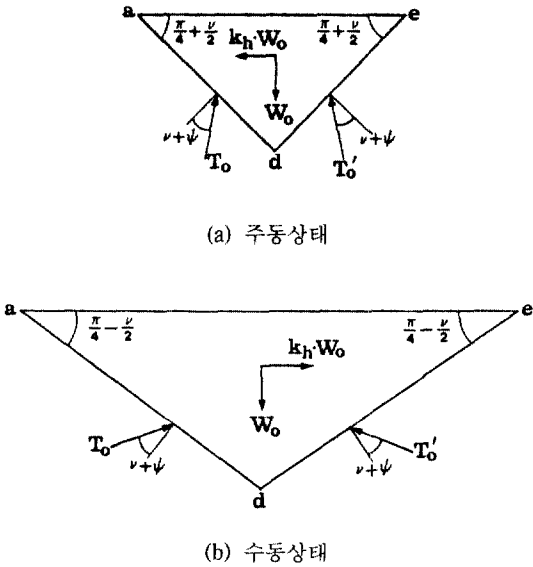
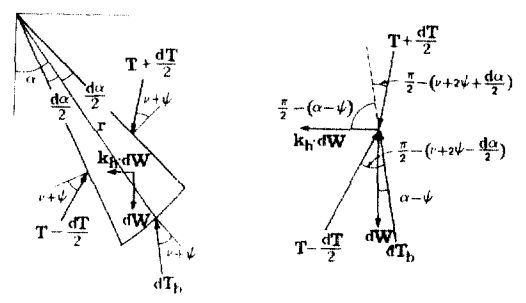
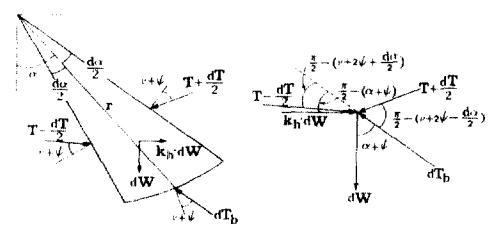


그림 7. Rankine영역에 작용하는 힘의 평형관계

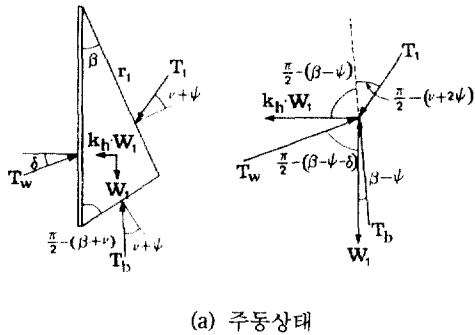


(a) 주동상태

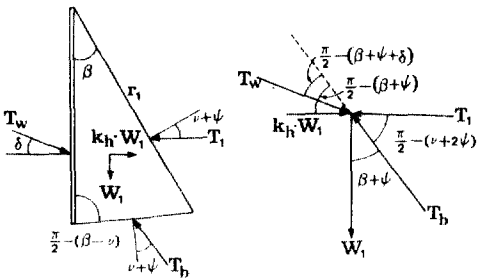


(b) 수동상태

그림 9. Goursat영역에 작용하는 힘의 평형관계



(a) 주동상태



(b) 수동상태

그림 8. 혼합영역에 작용하는 힘의 평형관계

$$\left(T - \frac{dT}{2}\right) \cdot \cos(\nu + 2\psi \mp \frac{d\alpha}{2}) - \left(T + \frac{dT}{2}\right) \cdot$$

$$\cos(\nu + 2\psi \pm \frac{d\alpha}{2}) - dW \cdot \sin(\alpha \mp \psi)$$

$$\mp k_h \cdot dW \cdot \cos(\alpha \mp \psi) = 0 \quad (11)$$

여기서, T : 연직축과 α 의 각도를 이루는 임의의 반경(영평창선)에 작용하는 힘

dW : 미소요소의 무게

식 (11)에서 $d \ll 1$ 이면 $\sin d \approx d$ 및 $\cos d \approx 1$ 이고, $dW = 1/2 \gamma \cdot r^2 \cdot d\alpha$ 이므로 식 (11)을 적분 가능한 형태로 변형하면,

$$d \left\{ \cos(\nu + 2\psi) \cdot T \cdot e^{\mp \tan(\nu - 2\psi) \cdot \alpha} \right\} + \quad (12)$$

$$\frac{1}{2} \gamma \cdot r^2 \cdot e^{\mp 2 \tan(\nu + 2\psi) \cdot \alpha} \cdot \sin(\alpha \mp \psi) \cdot d\alpha \pm$$

$$k_h \cdot \frac{1}{2} \gamma \cdot r^2 \cdot e^{\mp 2 \tan(\nu + 2\psi) \cdot \alpha} \cdot \cos(\alpha \mp \psi) \cdot d\alpha = 0$$

Rankine영역 및 혼합영역에서 영평창선 r_0 및 r_1 에 작용하는 합력 T_0 및 T_1 의 상호관계와 기하학적인 관계로부터 벽체에 작용하는 토압의 합력 T_w 를 구할 수 있다. 즉, 식 (12)에서 $\alpha = \beta \sim (\pi/4 \mp \nu/2)$ 의 구간에 대하여 정적분하고 T_w 에 관하여 정리하면

$$T_w = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot \frac{\cos^2(\beta \pm \nu)}{\cos^2 \nu \cdot \cos(\beta \mp \psi \mp \delta)} \cdot \left[\frac{\sin(\beta \mp \psi)}{\cot \beta \mp \tan \nu} + \cos \lambda \cdot \cos(\lambda + \psi \mp \beta) - e^{\mp \tan \lambda \cdot (\pi/4 \mp \nu/2 - \beta)} \cdot \left\{ \cos \lambda \cdot \cos\left(\lambda + \psi \mp \frac{\pi}{4} + \frac{\nu}{2}\right) - \cos \nu \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} \mp \frac{\nu}{2} \mp \psi\right) \right\} + \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot k_h \cdot \frac{\cos^2(\beta \pm \nu)}{\cos^2 \nu \cdot \cos(\beta \mp \psi \mp \delta)} \cdot \left[\pm \frac{\cos(\beta \mp \psi)}{\cot \beta \mp \tan \nu} + \cos \lambda \cdot \sin(\lambda + \psi \mp \beta) - e^{\mp \tan \lambda \cdot (\pi/4 \mp \nu/2 - \beta)} \cdot \left\{ \cos \lambda \cdot \sin\left(\lambda + \psi \mp \frac{\pi}{4} + \frac{\nu}{2}\right) \mp \cos \nu \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} \mp \frac{\nu}{2} \mp \psi\right) \right\} \right] \right] \quad (13)$$

여기서, $\tan \lambda = 2 \tan \nu + \tan(\nu + 2\psi)$

3.3 動的土壓係數의 決定

토압계수는 뒷채움 내부에 발생하는 鉛直應力과 임의의 깊이에서 발휘되는 全體水平土壓의 比로 정의되므로 動的 土壓係數는

$$\left(\begin{array}{c} K_{ad} \\ K_{pd} \end{array} \right) = \frac{T_w \cdot \cos \delta}{\frac{1}{2} \gamma \cdot H^2} \quad (14)$$

여기서, K_{ad} 및 K_{pd} : 각각 동적 주동토압계수 및 동적 수동토압계수

따라서 동적 토압계수는 식 (13) 및 (14)로부터

$$\left(\begin{array}{c} K_{ad} \\ K_{pd} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} K_a \\ K_p \end{array} \right) + k_h \cdot \left(\begin{array}{c} K'_a \\ K'_p \end{array} \right) \quad (15)$$

여기서

$$\left(\begin{array}{c} K_a \\ K_p \end{array} \right) = \frac{\cos^2(\beta \pm \nu) \cdot \cos \delta}{\cos^2 \nu \cdot \cos(\beta \mp \psi \mp \delta)} \cdot \left[\frac{\sin(\beta \mp \psi)}{\cot \beta \mp \tan \nu} + \cos \lambda \cdot \cos(\lambda + \psi \mp \beta) - e^{\mp \tan \lambda \cdot (\pi/4 \mp \nu/2 - \beta)} \cdot \left\{ \cos \lambda \cdot \cos\left(\lambda + \psi \mp \frac{\pi}{4} + \frac{\nu}{2}\right) - \cos \nu \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} \mp \frac{\nu}{2} \mp \psi\right) \right\} \right]$$

$$\left(\begin{array}{c} K'_a \\ K'_p \end{array} \right) = \frac{\cos^2(\beta \pm \nu) \cdot \cos \delta}{\cos^2 \nu \cdot \cos(\beta \mp \psi \mp \delta)} \cdot \left[\pm \frac{\sin(\beta \mp \psi)}{\cot \beta \mp \tan \nu} + \cos \lambda \cdot \sin(\lambda + \psi \mp \beta) - e^{\mp \tan \lambda \cdot (\pi/4 \mp \nu/2 - \beta)} \cdot \left\{ \cos \lambda \cdot \sin\left(\lambda + \psi \mp \frac{\pi}{4} + \frac{\nu}{2}\right) \mp \cos \nu \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} \mp \frac{\nu}{2} \mp \psi\right) \right\} \right]$$

$$\beta = \frac{\pi}{4} \mp \frac{\nu}{2} \pm \frac{\delta}{2} - \frac{1}{2} \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin \delta \cdot \cos \psi}{\sin(\psi + \nu)} \right\}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin \phi - \sin \nu}{\cos \nu} \right\}$$

한편, 식 (14)로부터 土壓의 合力은 벽체의 하단으로부터 1/3 H되는 곳에 작용하는 것으로 판단된다.

4. 分析 및 考察

위에서 유도된 動的土壓理論式을 고찰하기 위하여 k_h , δ 및 ν 값에 대하여 ϕ 의 변화에 따른 토압계수의 영향을 분석하는 한편, Mononobe-Okabe의 동적토압이론식과 비교하여 검토하였다. 한편, 이용가능한 측정결과가 없으므로 실측치와의 비교분석은 이루어지지 않았으나 차후 실험을 수행하여 그 결과를 발표할 예정이다.

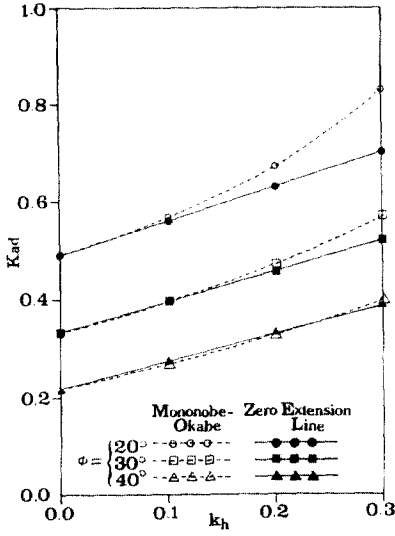
4.1 水平震度의 影響

그림 10은 k_h 및 ϕ 의 변화에 따른 토압계수의 영향을 $\delta = 1/2\phi$, $\nu = 5^\circ$ 의 조건에서 비교한 것으로서, ϕ 의 변화에 관계없이 k_h 의 증가에 따라 주동토압계수는 일정한 비율로 직선적으로 증가하는 반면, 수동토압계수는 직선적으로 감소하는 경향이 있다.

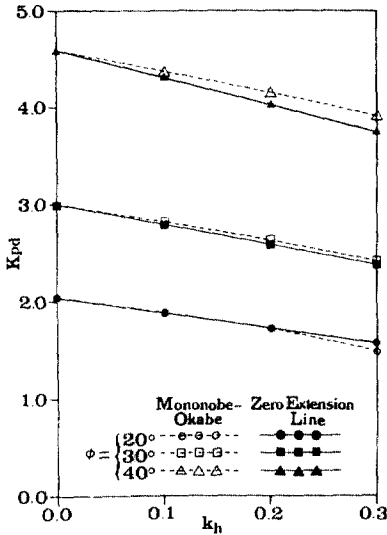
한편, Mononobe-Okabe의 식과 비교할 때 k_h 가 0.1 이하인 경우에는 토압계수의 차이가 거의 없고, 주동토압계수는 ϕ 가 클 때, 수동토압계수는 ϕ 가 작을 때 Mononobe-Okabe식의 값과 차이가 거의 없으며, 전체적으로는 Mononobe-Okabe의 값보다 다소 작은 값을 나타내는 경향이 있다.

4.2 壁摩擦角의 影響

그림 11은 δ 및 ϕ 의 변화에 따른 토압계수의 영향을 $\nu = 5^\circ$ 및 $k_h = 0.2$ 의 조건에서 비교한 것으로서,



(a) 주동토압계수



(b) 수동토압계수

그림 10. 수평진도의 영향

δ 의 증가에 따라 주동토압계수는 거의 직선적으로 감소하고, 수동토압계수는 증가하는 경향이 있다. 주동토압계수는 ϕ 가 작을수록 벽마찰각이 증가함에 따라서 변화가 급격한 반면에, 수동토압계수는 ϕ 가 클수록 변화가 급격한 경향이 있다.

한편, Mononobe-Okabe이론식과 비교할 때 δ 가 클수록 영평창선이론에 의한 값과 차이가 큰 경향이

있으며, 주동토압계수는 ϕ 가 클 때, 수동토압계수는 ϕ 가 작을 때 Mononobe-Okabe식과 거의 근사한 값을 갖는다.

4.3 다이레이션角의 影響

그림 12는 v 의 변화에 따른 토압계수의 변화를 $\delta=1/2\phi$, $k_h=0.2$ 의 조건에서 나타낸 것으로서, 주동토압계수는 ϕ 가 작을 때, 수동토압계수는 ϕ 가 클 때 v 의 증가에 따라 토압계수가 다소 감소하는 경향이 있으나 일반적으로 v 의 변화에 따른 토압계수의 변화는 거의 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

따라서 실용상으로 $v=0^\circ$ 로 하여도 무방하므로 식 (15)는 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} K_{ad} \\ K_{pd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_a \\ K_p \end{pmatrix} + k_h \cdot \begin{pmatrix} K'_a \\ K'_p \end{pmatrix} \quad (16)$$

여기서,

$$\begin{pmatrix} K_a \\ K_p \end{pmatrix} = \frac{\cos^2\beta \cdot \cos\delta}{\cos(\beta \mp \psi \mp \delta)} \cdot \left[\frac{\sin(\beta \mp \psi)}{\cot\beta} + \cos 2\psi \cdot \frac{\cos(3\psi \mp \beta)}{\cos(3\psi \mp \frac{\pi}{4}) - \sin(\frac{\pi}{4} \mp \psi)} \right]$$

$$\begin{pmatrix} K'_a \\ K'_p \end{pmatrix} = \frac{\cos^2\beta \cdot \cos\delta}{\cos(\beta \mp \psi \mp \delta)} \cdot \left[\pm \frac{\cos(\beta \mp \psi)}{\cot\beta} + \cos 2\psi \cdot \frac{\sin(3\psi \mp \beta)}{\cos(3\psi \mp \frac{\pi}{4}) \mp \sin(\frac{\pi}{4} \mp \psi)} \right]$$

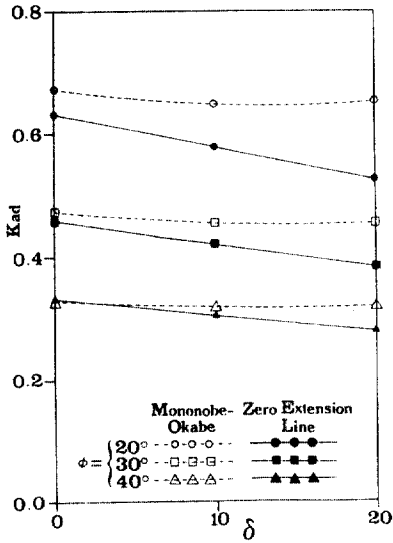
$$\beta = \frac{\pi}{4} \pm \frac{\delta}{2} - \frac{1}{2} \sin^{-1}(\sin\delta \cdot \cot\psi)$$

$$\psi = \tan^{-1}(\sin\phi)$$

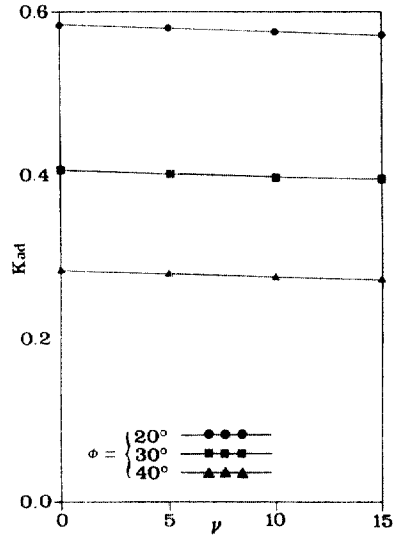
5. 結 論

本 研究는 零膨脹線理論과 Mononobe-Okabe의 動的土壓理論을 응용하여 새로운 動的土壓理論式을 제안한 것으로서, 이론식 중에 있는 水平震度 k_h , 흙의 内部摩擦角 ϕ , 壁摩擦角 δ 및 다이레이션角 v 등에 의한 영향을 분석하고, Mononobe-Okabe의 이론식과 비교분석한 결과는 다음과 같다.

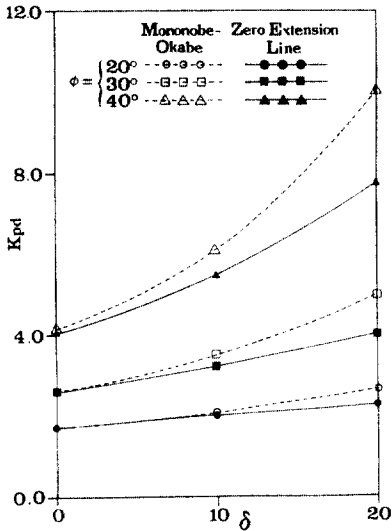
(1) 水平震도가 커질수록 ϕ 의 크기에 관계없이 거의 일정한 비율로, 주동토압계수는 직선적으로



(a) 주동토압계수

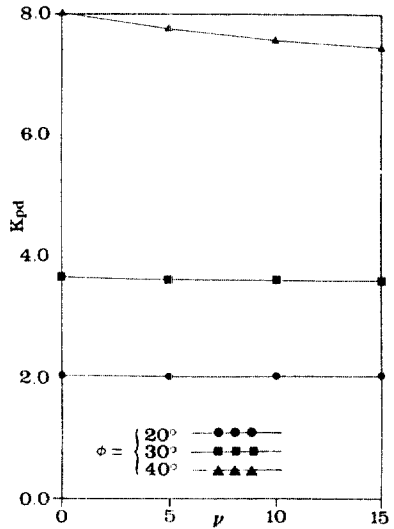


(a) 주동토압계수



(b) 수동토압계수

그림 11. 벽마찰각의 영향



(b) 수동토압계수

그림 12. 다이레이션각에 의한 영향

증가하고, 수동토압계수는 직선적으로 감소한다.

(2) 壁摩擦角에 의한 영향은 주동상태일 때는 ϕ 가 작을수록, 수동상태일 때는 ϕ 가 클수록 그 영향이 크다.

(3) 다이레이션각에 의한 영향은 주동토압의 경우에는 ϕ 가 작을 때, 수동토압의 경우에는 ϕ 가 클 때 다소 감소하는 경향이 있으나, 일반적으로 거의

무시할 수 있을 정도이다.

(4) 零膨脹線理論에 의한 動的土壓式은 ν 를 실용상 무시할 수 있으므로 k_a, ϕ 및 δ 의 함수로 표시되는 간략한 식 [식 (16)]으로 나타낼 수 있다.

(5) 零膨脹線理論에 의한 動的土壓理論式은 Mononobe-Okabe의 理論式과 비교할 때 主動土壓係數와 受動土壓係數에서 공통적으로 다소 작은 값을

나타내며, 주동토압의 경우에는 ϕ 가 클 때, 수동토압의 경우에는 ϕ 가 작을 때 Mononobe-Okabe의 이론식과 거의 같은 값을 갖는다.

(6) 零膨脹線理論에 근거한 土壓理論을 實驗적으로 檢證하는 것과 粘着性土 및 過載荷重에 대한 土壓解析은 將次の 研究課題이며, 追加로 實務에서 간편하게 이용할 수 있는 設計圖表를 제시하는 것도 바람직할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Braja, M.D., *Principles of Soil Dynamics*, PWS-KENT Publishing Co., Boston, 1993, pp. 328-368.
2. Clemence, S.P. and Gharhamani, A., "Zero Extension Line Theory of Dynamic Passive Pressure", *Journal of Geotechnical Division, ASCE*, Vol. 106, No. GT6, 1979, pp. 631-644.
3. Habibagahi, K., and Gharhamani, A., "Zero Extension Line Theory of Earth Pressure", *Journal of Geotechnical Division, ASCE*, Vol. 105, No. GT7, 1979, pp. 881-896.
4. James, R.G., and Bransby, P.L., "A Velocity Field for Some Passive Pressure Problem", *Geotechnique*, London, England, Vol. 21, No.1, 1971, pp. 61-83.
5. James, R.G., and Bransby, P.L., "Experimental and Theoretical Investigation of a Passive Earth Pressure Problem", *Geotechnique*, London, England, Vol. 20, No. 1, 1970, pp. 17-37.
6. Mononobe, N., "On the Determination of Earth Pressures During Earthquakes", *Proc. World Engineering Conference* 9, 1929, pp. 176-183.
7. Okabe, S., "General Theory of Earth pressure", *Journal of the Japanese Society of Civil Engineers (Tokyo)* 12, 1926.
8. Richards, R., and Elms, D.G., "Seismic Behavior of Gravity Retaining Walls", *Journal of Geotechnical Division, ASCE*, Vol. 105, No. 4, 1979, pp. 449-464.
9. Roscoe, K.H., et al. "The Influence of Strains in Soil Mechanics", *Geotechnique*, London, England, Vol. 20, No. 2, 1970, pp. 129-170.
10. Sabzebari, A., and Gharhamani, A., "Dynamic Passive Earth Pressure Problem", *Journal of Geotechnical Division, ASCE*, Vol. 100, GT1, 1974, pp. 15-30.
11. Sabzebari, A., and Gharhamani, A., "Theoretical Investigation of Passive Failure in an Earth Pressure Problem", *Soils and Foundations*, Vol. 13, No. 2, 1973, pp. 1-18.
12. Sokolovski, V.V., *Statics of Soil Media*, Butterworths, London, England, 1960.
13. Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley, New York, 1943.
14. 日本土質工學會, 土の強さと地盤の破壊入門, 1987, pp. 1-173.
15. 都德鉉, 高在晚, 耐震工學, 圖書出版 효성, 1993, pp. 241-300.
16. 黃正奎, 建設技術者를 위한 地盤工學의 基礎理論, 歐美書館, 1992, pp. 160-183.

(接受 : 1993. 7. 29)