

사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 작용하는 주동토압 (I) : 정식화

Active Earth Pressure against Caisson Backfilled with Crushed Rock and Sand (I) : Formulation

백 규 호¹ Paik, Kyu-Ho

Abstract

Coulomb's theory has traditionally been used for the estimation of active earth pressure acting on rigid walls. However, many experimental data show that active earth pressures on rough, rigid walls are nonlinearly distributed. This is due to the arching effects produced by friction between the wall and backfill materials when the wall translates away from the backfill. Although there are analyses that take arching into consideration for a horizontal backfill surface and a vertical rigid wall, these analyses were derived for homogeneous backfills. Therefore, it is not possible to use these analyses for a caisson backfilled with crushed rock and sand, a common type of rigid wall for harbor structures. In this study, a new formulation for calculation of the nonlinear active earth pressure acting on a caisson backfilled with crushed rock and sand is proposed considering both internal friction angles and unit weights of the crushed rock and sand.

요 지

일반적으로 강성 벽체에 작용하는 주동토압은 Coulomb의 토압이론에 의해 산정되어 왔다. 그러나 많은 시험결과에 따르면 벽면이 거친 강성 벽체에 작용하는 주동토압은 비선형으로 분포하며, 이러한 비선형의 토압분포는 벽체가 변위를 일으킬 때 벽체와 뒷채움재간의 마찰에 의해 뒷채움재에서 유발되는 아칭효과 때문에 발생하는 것으로 밝혀졌다. 현재까지 아칭효과를 고려해서 강성 벽체에 작용하는 주동토압을 산정할 수 있는 토압산정식들이 다양한 형태로 제안되었다. 그러나 이들 토압산정식은 뒷채움재가 균질한 경우에만 적용할 수 있는 것들로, 항만구조물에 사용되는 케이슨과 같이 배면이 사석과 모래로 뒷채움된 경우에는 적용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 대하여 비선형으로 분포하는 주동토압을 산정할 수 있는 토압산정식을 제안하였으며, 제안식을 도출하는 과정에서 사석과 모래의 단위중량과 내부마찰각의 영향이 모두 고려되었다.

Keywords : Caisson, Nonhomogeneous backfill, Nonlinear active earth pressure, Formulation

1. 서 론

육지에 건설되는 옹벽이나 항만구조물에 사용되는 케이슨과 같은 다양한 형태의 토류구조물을 경제적이면서 구조적으로 안정하게 설계·시공하기 위해서는 토

류구조물에 작용하는 주동토압의 크기와 분포형태를 정확히 산정해야 한다. 현재까지 토류구조물에 작용하는 주동토압은 토압의 분포형태를 삼각형으로 가정하는 Coulomb의 토압이론에 의하여 산정되고 있으며, 그 결과에 근거해서 토류구조물을 설계하고 있다. 그러

¹ 정회원, 관동대학교 공과대학 토목교통공학부 부교수 (Member, Associate. Prof., Civil and Transportation Eng. Div., Kwandong Univ., pkh@kd.ac.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

나 Tsagareli(1965)와 Fang과 Ishibashi(1986) 등의 시험 결과에 따르면 표면이 거친 강성 벽체에 작용하는 주동 토압은 비선형으로 분포하는 것으로 나타났다. 그리고 이러한 비선형의 토압분포는 벽체가 변위를 일으킬 때 벽체와 뒷채움재 간에 발생하는 마찰력으로 인해 뒷채움재에서 아칭효과가 발생하기 때문으로 보고되었다 (Terzaghi 1943, Handy 1985, 백규호 2003).

이러한 연구결과에 근거하여 뒷채움재가 균질(homogeneous)하고 배면이 연직인 강성 벽체의 경우에 대하여 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과를 고려해서 강성 벽체에 작용하는 비선형의 주동토압을 산정할 수 있는 토압산정식이 몇몇 연구자들(Handy 1985, Harrop-Williams 1989, Wang 2000, 백규호 2003)에 의하여 제안되었다. 그 중에서 백규호(2003)는 뒷채움재의 파괴면이 수평과 $45^\circ + \phi/2$ 의 각도를 이루고 아칭효과로 인해 뒷채움재에서 발생하는 최소주응력 궤적이 아크(arc)형태를 보인다는 가정 하에 평행이동하는 강성 벽체에 작용하는 비선형의 주동토압을 산정할 수 있는 토압산정식을 제안하였다. 그리고 이 토압산정식이 기존의 다른 토압산정식들보다 주동토압의 크기와 분포형태를 더 정확하게 예측하는 것으로 보고하였다.

아칭효과로 인한 뒷채움재에서의 응력상태 변화는 옹벽이나 암거를 매립한 도랑(ditch) 뿐만 아니라 그림 1과 같이 항만구조물에 사용되는 사석과 모래로 뒷채움된 케이슨의 경우에도 발생한다. 그러나 삼각형의 토압 분포를 제공하는 Coulomb의 토압이론은 물론 비선형의 주동토압을 산정하기 위하여 현재까지 제안된 모든 토압산정식들도 강성 벽체의 뒷채움재가 균질한 경우에 대해서만 적용이 가능하다. 따라서 케이슨과 같이 뒷채움재가 강도특성이 다른 두 개의 재료로 구성된 경우에

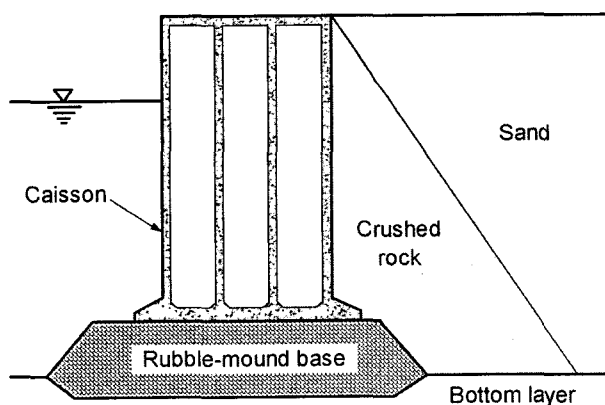


그림 1. 케이슨의 뒷채움 형태

는 기존에 제안된 토압산정식을 이용해서 주동토압을 산정하는 것 자체가 불가능한 것이 현실이다.

본 연구에서는 비선형의 주동토압분포를 산정할 수 있는 기존의 토압산정식 중 정확도가 가장 높은 것으로 알려진 백규호(2003)의 토압산정법에 근거해서 사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 대하여 비선형의 주동토압을 산정할 수 있는 토압산정식을 제안하였다. 이 과정에서 뒷채움재로 사용된 사석과 모래의 단위중량과 내부 마찰각은 물론 케이슨이 변위를 일으킬 때 아칭효과로 인해 뒷채움재에서 발생하는 응력상태의 변화도 고려되었다.

2. 뒷채움재에서 파괴면의 형상과 응력상태

2.1 뒷채움재의 파괴형상

Terzaghi(1943)의 연구결과에 따르면 강성 벽체의 뒷채움재에 발생하는 파괴면의 형태는 벽체의 거칠기(δ)와 변위형태에 따라 달라진다. 벽체의 표면이 매끄러운 경우($\delta=0^\circ$)에는 뒷채움재가 직선 형태로 파괴되고 표면이 거친 경우($\delta \neq 0^\circ$)에는 뒷채움재가 곡선 형태로 파괴되며, 벽체의 표면이 거칠다 하더라도 뒷채움재의 파괴형태는 벽체의 변위형태(평행이동, 정점 혹은 저점중심 회전)에 따라 달라진다. 그리고 강성 벽체에 작용하는 주동토압의 크기와 분포형태는 뒷채움재의 파괴면 형태에 따라 달라지는 것으로 보고되었다. 따라서 강성 벽체에 작용하는 비선형의 주동토압을 정확히 산정하기 위해서는 뒷채움재에서 발생하는 파괴면의 실제적인 형태를 토압산정식에 반영해야만 한다.

한편, 항만구조물에 사용되는 케이슨의 경우에도 케이슨과 뒷채움재간의 마찰에 의해 뒷채움재에서 아칭효과가 발생하며, 아칭효과를 고려해서 케이슨에 작용하는 비선형의 주동토압을 산정하기 위해서는 뒷채움재의 실제적인 파괴면 형태를 고려해서 토압산정식을 도출해야만 한다. 北島昭一 등(1967)은 사석과 모래로 뒷채움된 모형 케이슨에 대한 시험을 통해서 케이슨의 뒷채움재로 사용되는 사석에서는 파괴면이 직선으로 발생함을 보고하였다. 그리고 Handy(1985)와 Harrop-Williams(1989), 백규호(2003)는 뒷채움재가 균질하고 강성 벽체가 평행이동하는 경우 뒷채움재의 파괴면이 수평과 $45^\circ + \phi/2$ 의 각도를 이룬다는 가정 하에 산정된 비선형의 주동토압이 실측치와 상당히 유사함을 보였다. 따라서 본 연구

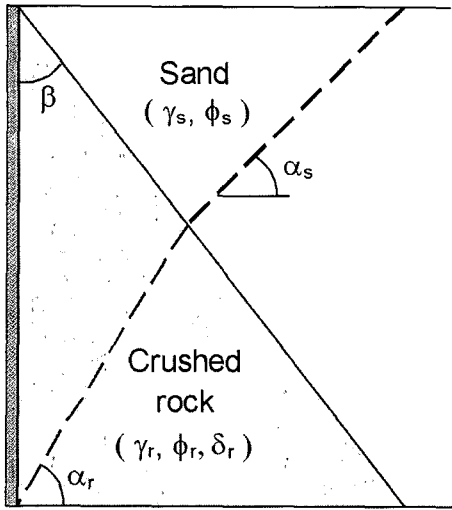


그림 2. 케이슨의 뒷채움재에서 파괴면의 형상

에서는 케이슨의 뒷채움재로 사용되는 사석과 모래의 내부마찰각 차이와 토압산정식을 도출하는 과정에서 계산의 편의성을 고려해서 케이슨의 뒷채움재에 대한 파괴면의 형태를 그림 2와 같이 사석과 모래에서 기울기가 달라지는 2개의 직선으로 구성하였다. 그리고 각 영역의 직선 파괴면은 수평으로부터 $45^\circ + \phi/2$ 만큼 경사진 것으로 가정하였다.

2.2 뒷채움재에서 최소주응력의 궤적

일반적으로 강성 벽체가 변위를 일으키면 벽체와 뒷채움재간에 마찰이 발생하며, 이 마찰력으로 인해 뒷채움재의 미소수평요소로 작용하는 최대 및 최소주응력은 그림 3과 같이 연직과 수평방향에서 점선으로 표시된 최소주응력 궤적에 직각과 접선방향으로 회전한다. 이때 케이슨과 뒷채움재간의 마찰력은 미소수평요소로 작용하는 주응력의 작용방향만을 회전시킬 뿐 크기에는 전혀 영향을 주지 않는다(Handy, 1985). 그리고 최소주응력 궤적의 형태는 다양하게 거론되고 있으나 본 연구에서는 원호(arc)로 가정하였다. 이러한 원호형태의 최소주응력 궤적은 뒷채움재의 파괴면이 수평과 $45^\circ + \phi/2$ 를 이룬다는 파괴면에 대한 가정과 입의 하중조건 하에서 흙에 발생하는 파괴면은 최소주응력 방향과 $45^\circ + \phi/2$ 의 각을 이룬다는 토질역학 이론을 고려하면 뒷채움재의 파괴면에서 최소주응력 궤적은 수평이 된다는 것을 의미한다. 따라서 아칭효과로 인해 뒷채움재에 작용하는 주응력이 회전하게 되면 미소수평요소로 작용하는 연직응력은 감소하게 되며, 이러한 주응력의

회전에 따른 연직응력의 감소는 주응력의 회전각이 클수록, 즉 벽체에 근접할수록 커지는 것으로 나타났다(Handy 1985, 백규호 2003).

또한 뒷채움재의 미소수평요소와 벽체간에 발생하는 마찰력이 미소수평요소의 자중을 일부 지지함으로써 깊이가 깊어질수록 미소수평요소에 작용하는 연직응력은 감소하게 되며, 이러한 형태의 연직응력 감소를 Handy(1985)는 마찰력의 누적효과(accumulative effect)라 하였다. 즉, 벽체와 뒷채움재간에 마찰이 없는 경우에 두께가 dz 이고 단위중량이 γ 인 미소수평요소에 γz 의 연직응력이 작용하고 바로 아래에 위치한 미소수평요소에는 $\gamma(z+dz)$ 의 응력이 작용한다. 그러나 그림 3과 같이 벽체와 뒷채움재간에 마찰력이 존재하면 미소수평요소의 자중 중 일부가 마찰력에 의해 지지되기 때문에 바로 아래 위치한 미소수평요소에는 $\gamma(z+dz)$ 보다 작은 연직응력이 작용하게 된다. 따라서 강성 벽체와 뒷채움재간에 마찰력이 발생하는 경우 벽체에 작용하는 주동토압을 정확하게 산정하기 위해서는 주응력의 회전에 의한 연직응력 감소와 마찰력의 누적효과에 의한 연직응력 감소를 모두 고려해야만 한다.

한편, Handy(1985)와 Harrop-Williams(1989), 백규호(2003)의 연구결과에 따르면 강성 벽체에 작용하는 주응력의 회전각은 뒷채움재의 내부마찰각(ϕ)이 작고 벽

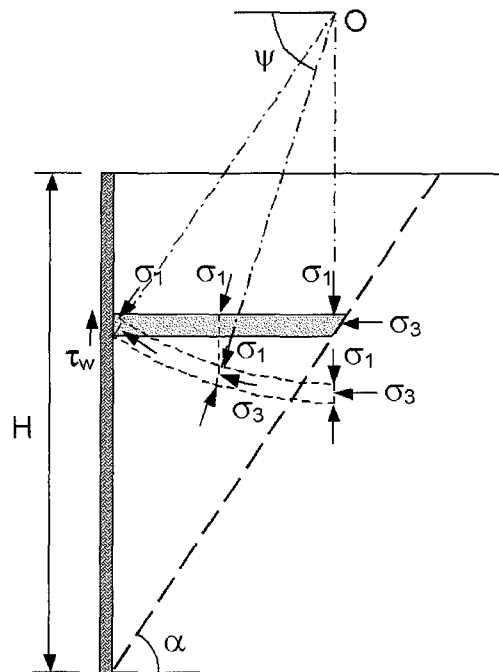


그림 3. 뒷채움재가 균질한 경우 뒷채움재에서 발생하는 최소주응력 궤적

체의 벽면마찰각(δ)이 클수록 커지는 것으로 나타났다. 이러한 연구결과를 사석이 연직으로부터 β 의 각도로 먼저 뒷채움되고 나머지 부분이 모래로 뒷채움되는 케이스에 적용할 경우 뒷채움재에서 발생하는 최소주응력 궤적은 그림 4와 같이 미소수평요소의 위치에 따라 그 형상이 달라진다. 즉, 미소수평요소가 사석과 모래로 이루어지는 $0 \leq z \leq H_1$ 의 범위에서는 모래보다 사석의 내부마찰각이 더 크므로 모래보다 사석에서 발생하는 최소주응력 궤적의 회전반경이 더 크게 된다. 그리고 미소수평요소가 사석으로만 이루어지는 $H_1 \leq z \leq H$ 의 범위에서는 최소주응력 궤적이 단일 원호(arc)의 형태를 보이게 된다. 여기서 H_1 은 사석의 뒷채움 경사면과 뒷채움재의 파괴면이 교차하는 지점(A점)의 깊이이다.

따라서 뒷채움재에서 발생하는 최소주응력 궤적의 회전반경이 사석과 모래에서 달라지는 $0 \leq z \leq H_1$ 의 범위에서 사석 영역에 형성되는 최소주응력 궤적의 형상은 사석의 내부마찰각(ϕ_r)과 사석과 케이스간의 벽면마찰각(δ_r)에 의해 결정되었다. 그리고 모래 영역에서 형성되는 최소주응력 궤적의 형상은 모래의 내부마찰각(ϕ_s)과 가상의 벽면마찰각(δ_s)을 이용해서 결정되었다. 이때 사석과 모래의 내부마찰각이 같은 경우에는 뒷채움재에서 발생하는 최소주응력의 궤적이 단일 원호의 형태가 되어야 하는 것을 고려해서 가상의 벽면마찰각 δ_s 는 식 (1)과 같이 가정되었다.

$$\delta_s = \frac{\phi_s}{\phi_r} \delta_r \quad (1)$$

또한 최소주응력 궤적이 단일 원호의 형태를 보이는

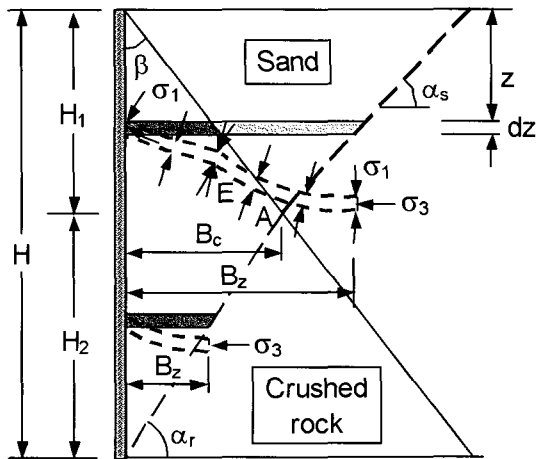


그림 4. 케이스의 경우 뒷채움재에서 발생하는 최소주응력 궤적

$H_1 \leq z \leq H$ 의 범위에는 최소주응력 궤적의 형상이 사석의 내부마찰각(ϕ_r)과 사석과 케이스간의 벽면마찰각(δ_r)에 의해 결정되었다.

그리고 앞에서 언급된 H_1 은 사석의 경사면과 뒷채움재의 파괴면 사이에 기하학적인 관계를 고려해서 식 (2)와 같이 계산될 수 있으며,

$$H_1 = \frac{H}{1 + \tan \alpha_r \tan \beta} \quad (2)$$

깊이 z 에 위치하는 미소수평요소의 폭 B_z 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$0 \leq z \leq H_1 \text{에서 } B_z = B_c + \frac{H_1 - z}{\tan \alpha_s} = \frac{\alpha H - z}{\tan \alpha_s} \quad (3a)$$

$$H_1 \leq z \leq H \text{에서 } B_z = \frac{H - z}{\tan \alpha_r} \quad (3b)$$

여기서, H 는 케이스의 높이이고 B_c 는 A점의 깊이에 위치하는 미소수평요소의 폭이며, $a = \frac{(1 + \tan \alpha_s \tan \beta)}{(1 + \tan \alpha_r \tan \beta)}$ 이다. 그리고 $\alpha_j = 45^\circ + \phi_j/2$ 이며, 여기서 $j=r$ 일 때는 사석을, $j=s$ 일 때는 모래를 의미한다.

3. 주응력의 회전을 고려한 토압계수 산정

3.1 토압계수 산정

Handy(1985)와 백규호(2003)의 연구결과에 따르면 뒷채움재가 균질하고 지표면이 수평인 경우 벽체와 뒷채움재간의 마찰력에 의한 주응력의 회전에 인해서 뒷채움재의 미소수평요소에 작용하는 연직응력은 강성벽체에 가까워질수록 그 크기가 작아지는 경향을 보인다. 따라서 미소수평요소에 작용하는 평균 연직응력($\bar{\sigma}_v$)에 대한 벽체에 작용하는 수평응력(σ_{hw})의 비로 정의되는 토압계수 K_w 를 구하기 위해서는 먼저 미소수평요소에 작용하는 전체연직력 V 를 미소수평요소의 폭으로 나눔으로써 $\bar{\sigma}_v$ 를 구해야 한다. 이를 위해서는 미소수평요소의 각 위치에 작용하는 최대주응력의 크기와 작용방향이 결정되어야 한다. 그러나 뒷채움재가 사석과 모래로 구성되는 케이스의 경우에는 미소수평요소에 작용하는 최대주응력의 크기와 작용방향이 사석과 모래 영역에서 각기 다르기 때문에 미소수평요소의 토압계수 K_w 도 모래와 사석이 공존하는 $0 \leq z \leq H_1$ 범위

와 사석만이 존재하는 $H_1 \leq z \leq H$ 의 범위로 구분해서 산정해야 한다.

(1) $0 \leq z \leq H_1$ 범위

그림 5와 같이 이 범위에 존재하는 미소수평요소에 작용하는 최대주응력 σ_1 은 동일한 미소수평요소 내에서도 위치에 따라 그 값이 달라진다. 그림 5(a)와 같이 미소수평요소가 사석으로 구성되는 영역($\theta_{cr} \leq \psi \leq \theta_{ir}$)에서 케이스 벽면으로부터 수평으로 $x = R_r(\cos\theta_{cr} - \cos\psi)$ 만큼 떨어진 B점에 작용하는 최대주응력은 식 (4)와 같이 B점에 작용하는 상재압으로 계산된다.

$$\sigma_1 = \gamma_r z - (\gamma_r - \gamma_s) \frac{R_r(\cos\theta_{cr} - \cos\psi)}{\tan\beta} \quad (4)$$

그리고 미소수평요소가 모래로 구성되는 영역($\theta_{is} \leq \psi \leq \pi/2$)에서는 그림 5(b)와 같이 최대주응력이 $\sigma_1 = \gamma_s z$ 가 된다. 여기서, γ_s 와 γ_r 은 모래와 사석의 단위중량이고 θ_{cr} 은 케이스의 벽면에서 최대주응력과 수평이 이루는 각도이며, R_r 은 사석 영역에 발생하는 최소주응력 궤적의 회전반경이다. 그리고 θ_{ir} 과 θ_{is} 는 사석의 뒷채움

경사면과 미소수평요소가 교차하는 지점(C점)에 작용하는 최대주응력 중 각각 사석 영역과 모래 영역에 작용하는 최대주응력이 수평과 이루는 각도를 나타낸다. 따라서 θ_{ir} 은 사석의 내부마찰각(ϕ_r)과 케이스-사석간의 벽면마찰각(δ_r)으로부터 결정되며, θ_{is} 는 모래의 내부마찰각(ϕ_s)과 케이스-사석간의 벽면마찰각(δ_s)으로부터 계산될 수 있다.

한편, 뒷채움재가 균질한 경우 미소수평요소의 임의의 지점에 작용하는 수평응력은 응력을 구하고자 하는 지점에 대응하는 위치에 있는 최소주응력 상의 삼각형 요소에 대하여 수평방향 힘평형을 고려함으로써 식 (5)와 같이 얻을 수 있다(Handy 1985, 백규호 2003).

$$\sigma_{h(j)} = \sigma_1(\cos^2\psi + K_j \sin^2\psi) \quad (5)$$

그리고 이 식에 $\sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_{v(j)} + \sigma_{h(j)}$ 를 대입하면 미소수평요소의 임의의 지점에 작용하는 연직응력은 식 (6)과 같이 그 지점에 작용하는 최대주응력의 함수로 표현된다.

$$\sigma_{v(j)} = \sigma_1(\sin^2\psi + K_j \cos^2\psi) \quad (6)$$

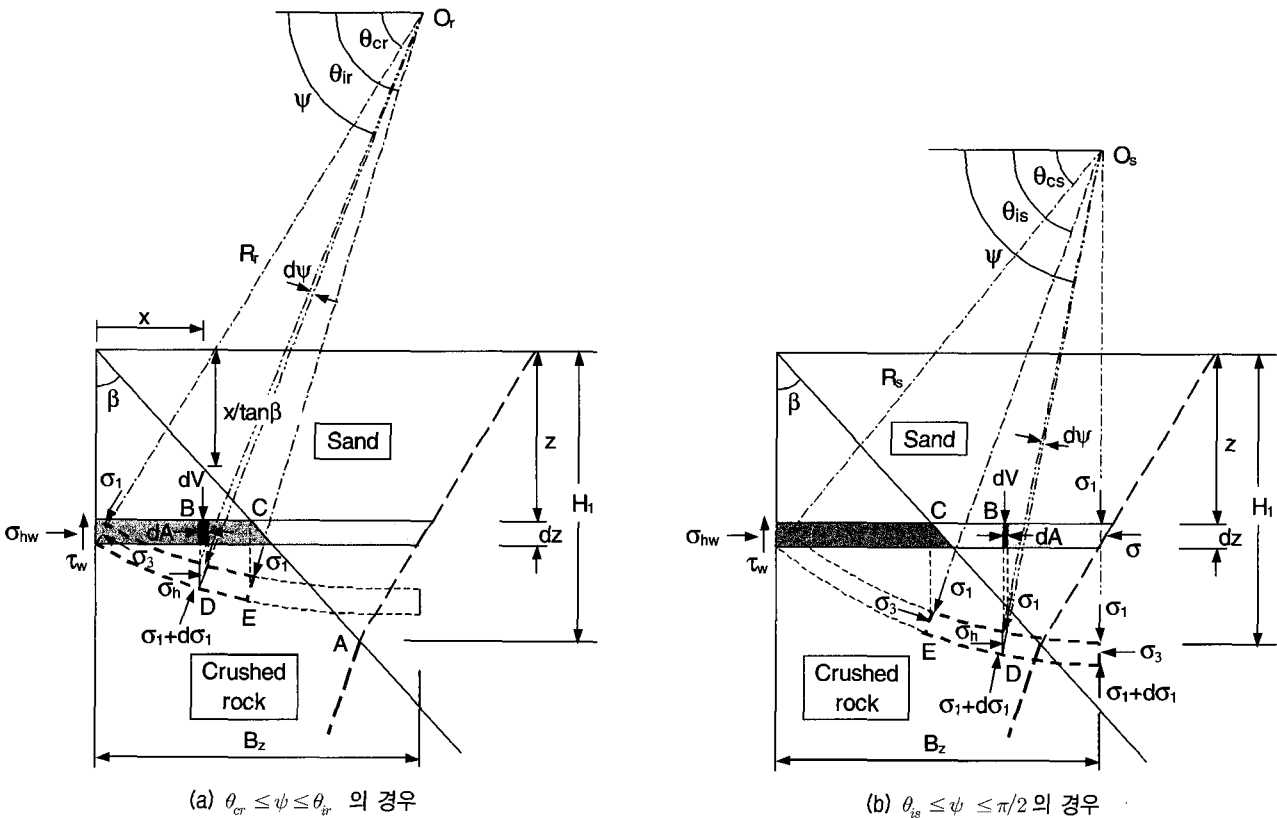


그림 5. $0 \leq z \leq H_1$ 의 경우 미소수평요소에 작용하는 평균 연직응력의 산정

여기서 K_j 는 최대주응력에 대한 최소주응력의 비로써 $K_j = \tan^2(45^\circ - \phi_j/2)$ 로 계산되며, $j=r$ 일 때는 사석에 대한 값을 그리고 $j=s$ 일 때는 모래에 대한 값을 의미한다. 따라서 뒷채움재가 모래로만 구성되어 있는 경우 ($\beta=0^\circ$)와 사석으로만 구성되어 있는 경우($\beta=90^\circ$)에 케이슨의 벽체에 작용하는 수평응력, $\sigma_{hw(s)}$ 과 $\sigma_{hw(r)}$ 은 식 (5)에 각각 $\psi = \theta_{cs}$ 와 $\psi = \theta_{cr}$ 을 대입함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{hw(j)} = (\gamma_j z)(\cos^2 \theta_{cj} + K_j \sin^2 \theta_{cj}) \quad (7)$$

이 식은 케이슨에 작용하는 수평응력이 사석의 뒷채움 경사각(β)에 따라 달라지는 것을 의미한다. 따라서 사석의 뒷채움 경사각이 $0^\circ < \beta < 90^\circ$ 인 경우에 케이슨에 작용하는 수평응력은 식 (8)과 같이 계산될 수 있다.

$$\sigma_{hw} = \sigma_{hw(r)} \frac{\cos \theta_{cr} - \cos \theta_{ir}}{\cos \theta_{cr}} + \sigma_{hw(s)} \frac{\cos \theta_{is}}{\cos \theta_{cr}} \quad (8)$$

식 (8)에 따르면 뒷채움재가 모래로만 구성($\beta=0^\circ$)되어 있을 때는 $\theta_{ir} = \theta_{cr}$ 이므로 케이슨에 작용하는 수평응력은 $\sigma_{hw} = \sigma_{hw(s)}$ 이 되며, 뒷채움재가 사석으로만 구성($\beta=90^\circ$)되어 있을 때는 $\theta_{ir} = 90^\circ$ 이므로 케이슨에 작용하는 수평응력은 $\sigma_{hw} = \sigma_{hw(r)}$ 이 된다. 이것은 뒷채움재가 균질한 경우에 Handy(1985)와 백규호(2003)가 산정한 주응력의 회전만을 고려한 강성 벽체에 작용하는 수평응력과 일치한다. 그리고 앞에서 언급하였듯이 아칭 효과를 고려한 주동토압을 산정하기 위해서는 주응력의 회전에 의한 연직응력 감소와 함께 마찰력의 누적효과에 의한 연직응력 감소도 고려해야 한다. 그러나 식 (8)에서는 단지 케이슨과 뒷채움재간에 발생하는 마찰에 의한 주응력의 회전만을 고려했을 뿐 미소수평요소의 누적효과에 의한 연직응력의 감소에 의한 영향은 전혀 고려하지 아니하였다. 따라서 식 (8)에서 얻어지는 수평응력은 이후에 언급될 아칭효과가 고려된 케이슨에 작용하는 수평주동토압과 다르다는 것에 주의해야 한다.

사석과 모래로 뒷채움된 케이슨의 경우 미소수평요소에 작용하는 연직응력은 응력을 구하고자 하는 점이 사석 영역($\theta_{cr} \leq \psi \leq \theta_{ir}$)에 존재하는지 모래 영역($\theta_{is} \leq \psi \leq \pi/2$)에 존재하는지에 따라 식 (6)에 식 (4)를 대입하거나 $\sigma_1 = \gamma_s z$ 을 대입함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$\theta_{cr} \leq \psi \leq \theta_{ir}$ 에서

$$\sigma_{v(r)} = \left[\gamma_r z - (\gamma_r - \gamma_s) \frac{R_r (\cos \theta_{cr} - \cos \psi)}{\tan \beta} \right] (\sin^2 \psi + K_r \cos^2 \psi) \quad (9a)$$

$$\theta_{is} \leq \psi \leq \pi/2 \text{에서 } \sigma_{v(s)} = (\gamma_s z) (\sin^2 \psi + K_s \cos^2 \psi) \quad (9b)$$

그러므로 깊이 z 에 위치하는 미소수평요소에 작용하는 전체 연직력 V 는 미소수평요소의 미소면적 $dA (= R_j \sin \psi d\psi)$ 에 작용하는 연직응력을 $\theta_{cr} \leq \psi \leq \theta_{ir}$ 와 $\theta_{is} \leq \psi \leq \pi/2$ 범위에 대하여 적분한 후 두 값을 더함으로써 식 (10)과 같이 구해지며,

$$V = \int_{\theta_{cr}}^{\theta_{ir}} \sigma_{v(r)} dA + \int_{\theta_{is}}^{\pi/2} \sigma_{v(s)} dA \quad (10)$$

미소수평요소에 작용하는 연직응력의 평균치인 $\bar{\sigma}_v$ 는 전체연직력 V 를 미소수평요소의 폭($B_z = R_r \cos \theta_{cr}$ 또는 $R_s \cos \theta_{cs}$)로 나눔으로써 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_v = \frac{V}{B_z} = & \left[\frac{\gamma_r z}{\cos \theta_{cr}} - \frac{(\gamma_r - \gamma_s) B_z}{\cos \theta_{cr} \tan \beta} \right] \left[\frac{1 - K_r}{3} (\cos^3 \theta_{ir} - \cos^3 \theta_{cr}) \right. \\ & \left. - (\cos \theta_{ir} - \cos \theta_{cr}) \right] + \frac{(\gamma_r - \gamma_s) B_z}{4 \cos^2 \theta_{cr} \tan \beta} [(\sin^4 \theta_{ir} - \sin^4 \theta_{cr}) \\ & - K_r (\cos^4 \theta_{ir} - \cos^4 \theta_{cr})] + \frac{\gamma_s z}{\cos \theta_{cs}} \left(\cos \theta_{is} - \frac{1 - K_s}{3} \cos^3 \theta_{is} \right) \quad (11) \end{aligned}$$

따라서 미소수평요소가 $0 \leq z \leq H_1$ 의 범위에 존재하는 경우 주응력의 회전을 고려한 미소수평요소에 대한 토압계수 K_w 는 식 (8)에서 얻어진 케이슨에 작용하는 수평응력 σ_{hw} 를 식 (11)에서 얻은 미소수평요소에 작용하는 평균 연직응력 $\bar{\sigma}_v$ 으로 나눔으로써 계산될 수 있다.

(2) $H_1 \leq z \leq H$ 범위

그림 6과 같이 미소수평요소가 $H_1 \leq z \leq H$ 의 범위에 존재하는 경우 미소수평요소에 작용하는 연직응력은 식 (9a)로부터 구할 수 있다. 그리고 미소수평요소에 작용하는 연직력 V 는 미소면적 $dA (= R'_r \sin \psi d\psi)$ 에 작용하는 연직응력 $\sigma_{v(r)}$ 을 $\theta_{cs} \leq \psi \leq \pi/2$ 의 범위에 대하여 적분함으로써 구할 수 있으며, 미소수평요소에 작용하는 연직력 V 를 미소수평요소의 폭($B_z = R'_r \cos \theta_{cr}$)으로 나누면 미소수평요소에 작용하는 연직응력의 평균치는 다음과 같이 계산된다.

4. 아칭효과를 고려한 주동토압 산정식

일반적으로 강성 벽체의 뒷채움재에서 아칭효과가 발생하면 뒷채움재에 작용하는 주응력이 회전함으로써 미소수평요소에 작용하는 연직응력이 감소하게 되고 동시에 벽체와 뒷채움재간에 작용하는 마찰력의 누적효과로 인해 깊이가 깊어짐에 따라서도 미소수평요소에 작용하는 연직응력이 감소하게 된다. 따라서 아칭효과를 고려한 강성 벽체에 작용하는 비선형의 주동토압은 벽체와 뒷채움재간에 작용하는 마찰력의 누적효과가 반영된 연직응력에 주응력의 회전에 의한 연직응력의 감소가 고려된 토압계수를 곱함으로써 구할 수 있다.

마찰력의 누적효과가 고려된 미소수평요소에 작용하는 연직응력은 그림 8과 같이 미소수평요소에 작용하는 4개의 연직력(미소수평요소의 자중과 미소수평요소의 윗면과 아랫면에 작용하는 등분포의 연직응력, 미소수평요소의 측면에 작용하는 마찰력)에 대한 힘평형의 결과를 벽체의 높이에 대하여 적분함으로써 구할 수 있다 (Handy 1985). 이때 미소수평요소의 자중은 사석의 뒷채움 경사면과 파괴면이 교차하는 A점을 기준으로 미소수평요소가 이보다 위에 존재하는 경우와 아래에 존재하는 경우에 각기 다르게 계산된다. 즉, 그림 8(a)에 보이는 바와 같이 미소수평요소가 A점보다 위($0 \leq z \leq H_1$)에 존재하면 미소수평요소가 사석과 모래로 구성되므로 미소수평요소의 자중 dW 는 식 (16a)와 같이 계산된다. 반면, 미소수평요소가 A점보다 아래($H_1 \leq z \leq H$)에 위치하면 미소수평요소가 사석으로만 구성되므로 미소수평요소의 자중은 식 (16b)와 같이 계산된다.

$$0 \leq z \leq H_1 \text{에서 } dW = [(B_z - z \tan \beta) \gamma_s + z \tan \beta \gamma_r] dz \quad (16a)$$

$$H_1 \leq z \leq H \text{에서 } dW = \gamma_r B_z dz \quad (16b)$$

따라서 미소수평요소에 작용하는 연직력에 대한 힘평형은 A점을 기준으로 $0 \leq z \leq H_1$ 의 범위와 $H_1 \leq z \leq H$ 의 범위에 대하여 별도로 고려되어야 한다.

(1) $0 \leq z \leq H_1$ 범위

그림 8(a)에 보이는 바와 같이 케이슨이 평행이동하면 뒷채움재에 존재하는 미소수평요소의 왼편 단부에는 케이슨과 뒷채움재간에 마찰력 τ_w 가 발생한다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 수평으로부터 $45^\circ + \phi_s/2$ 만큼 기울어진 뒷채움재의 파괴면상에는 최대 및 최소 주응력이 각각 연직과 수평방향으로 작용하게 되므로 미소수평요소의 오른편 단부 연직면에는 최소주응력이 수평방향으로 작용할 뿐 어떠한 전단력도 작용하지 않게 된다. 따라서 미소수평요소에 대한 연직방향 힘평형식은 식 (17)과 같이 얻어진다.

$$d\bar{\sigma}_v B_z + \bar{\sigma}_v K_w \tan \delta dz = [(B_z - z \tan \beta) \gamma_s + z \tan \beta \gamma_r] dz \quad (17)$$

여기서 왼편의 두 번째 항이 미소수평요소의 왼편 단부에 작용하는 마찰력 τ_w 을 나타낸다.

한편, 마찰력 τ_w 의 누적효과가 고려된 미소수평요소에 작용하는 연직응력을 구하기 위해서는 식 (17)을 깊이 z 에 대하여 적분해야 한다. 그러나 식 (3)과 (8), (11), (12), (15)에서 보듯이 B_z 와 K_w , θ_{ij} 가 z 의 함수이기 때문에 식 (17)을 해석적으로 적분하는 것은 매우 어렵다. 따라서 식 (17)에 B_z 에 대한 식 (3)을 대입하고 케이슨의 높이를 세분화한 후 그림 9에 보이는 바와 같이 각

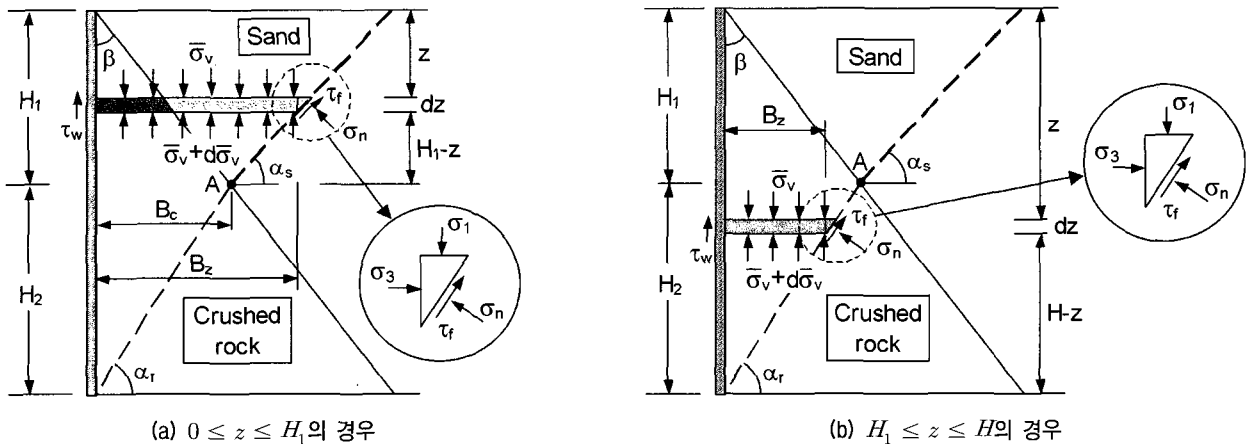


그림 8. 미소수평요소에 대한 힘평형

세부영역($z_{i-1} \leq z \leq z_i$)에서 K_w 는 일정하다고 가정하면 식 (17)은 수치적으로 적분이 가능하다. 이렇게 얻어진 식 (17)의 해에 2개의 경계조건($z=0$ 에서 $\overline{\sigma}_v=0$, $z=z_{i-1}$ 에서 $\overline{\sigma}_v=\overline{\sigma_{v(i-1)}}$)을 적용하면 미소수평요소 작용하는 마찰력의 누적효과가 고려된 평균 연직응력을 식 (18)과 같이 얻을 수 있다.

$$\overline{\sigma_{v(i)}} = \frac{aH - z_i}{m_i} \left\{ \left(\frac{aH - z_{i-1}}{aH - z_i} \right)^{m_i} \left[\frac{m_i}{aH - z_{i-1}} \overline{\sigma_{v(i-1)}} + \gamma_s \right] - \left(\frac{m_i z_{i-1}}{aH - z_{i-1}} + 1 \right) \frac{(\gamma_r - \gamma_s) \tan \beta}{K_{w(i)} \tan \delta_r} \right\} + \left(\frac{m_i z_i}{aH - z_i} + 1 \right) \frac{(\gamma_r - \gamma_s) \tan \beta}{K_{w(i)} \tan \delta_r} - \gamma_s \quad (18)$$

여기서 첨자 i 는 그림 9에서 보듯이 깊이 z_i 를 의미하고 $\overline{\sigma_{v(i)}}$ 와 $K_{w(i)}$ 는 z_i 의 깊이에 존재하는 미소수평요소 작용하는 평균 연직응력과 주응력의 회전이 고려된 토압계수이며, $m_i = 1 - K_{w(i)} \tan \alpha_s \tan \delta_r$ 이다. 식 (18)을 이용해서 연직응력을 산정할 때 $z_i = 0$ 이면 $z_{i-1} = \overline{\sigma_{v(i)}} = 0$ 이고 $K_{w(i-1)} = K_{w(i)}$ 이 되며, 뒷채움재가 모래로만 구성 되어 있는 경우($\beta = 0^\circ$)에는 식 (18)과 m_i 에 대한 식에서 $\delta_r = \delta_s$ 가 된다. 따라서 임의의 깊이 z_i 에서 아칭효과가 고려된 케이슨에 작용하는 수평주동응력 $\sigma_{ahw(i)}$ 는 식 (19)와 같이 식 (18)에서 얻어진 평균 연직응력에 주응력의 회전으로 인한 연직응력의 감소가 고려된 토압계수 $K_{w(i)}$ 를 곱함으로써 구할 수 있다.

$$\sigma_{ahw(i)} = K_{w(i)} \overline{\sigma_{v(i)}} \quad (19)$$

(2) $H_1 \leq z \leq H$ 범위

그림 8(b)에 보이는 바와 같이 미소수평요소가 사석의 뒷채움 경사면과 파괴면이 교차하는 A점보다 밑에 존재하는 경우에 미소수평요소 작용에 대한 연직방향 힘평형을 고려하면 다음과 같은 미분방정식이 얻어진다.

$$d\overline{\sigma}_v B_z + \overline{\sigma}_v K_w \tan \delta_r dz = \gamma_r B_z dz \quad (20)$$

그리고 $0 \leq z \leq H_1$ 범위에서와 마찬가지로 $H_1 \leq z \leq H$ 범위의 케이슨 높이를 세분화하고 각 세부영역($z_{i-1} \leq z \leq z_i$)에서 $K_{w(i)}$ 는 일정하다는 가정 하에 식 (20)을 수치적으로 적분한 후 2개의 경계조건($z=H_1$ 에서 식 (18)과 (20)에서 얻어지는 $\overline{\sigma}_v$ 가 같다는 것, $z=z_{i-1}$ 에서 $\overline{\sigma}_v = \overline{\sigma_{v(i-1)}}$)을 적용하면 식 (21)과 같은 해가 얻어진다.

$$\overline{\sigma_{v(i)}} = \left(\frac{H - z_i}{H - z_{i-1}} \right)^{1 - n_i} \left[\overline{\sigma_{v(i-1)}} + \frac{\gamma_r}{n_i} (H - z_{i-1}) \right] - \frac{\gamma_r}{n_i} (H - z_i) \quad (21)$$

여기서, $n_i = 1 - K_{w(i)} \tan \alpha_r \tan \delta_r$ 이다. 따라서 임의의 깊이 z_i 에서 케이슨에 작용하는 수평주동응력 $\sigma_{ahw(i)}$ 는 식 (21)에서 얻어진 평균 연직응력에 주응력의 회전에 의한 연직응력 감소가 고려된 토압계수 $K_{w(i)}$ 를 곱함으로써 계산될 수 있다.

5. 결론

강성 벽체가 변위를 일으키면 벽체와 뒷채움재간에 발생하는 마찰력으로 인해 뒷채움재에서 아칭효과가 발생하고, 이렇게 발생된 아칭효과 때문에 벽체에 작용하는 주동토압은 비선형의 형태로 분포하는 것으로 알려져 있다. 이러한 연구결과에 근거해서 최근들어 몇몇 연구자들이 강성 벽체에 작용하는 비선형의 주동토압을 산정하기 위하여 아칭효과를 고려한 토압산정식을 제안하였다. 그러나 이 제안식들은 모두 강성 벽체의 뒷채움재가 균질한 경우에만 적용할 수 있는 것으로, 항만 구조물에 사용되는 케이슨과 같이 뒷채움재가 사석과 모래로 구성되는 경우에는 적용이 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 항만구조물에 사용되는 케이슨과 같이 강성 벽체의 배면이 사석과 모래로 뒷채움된 경우에 대하여 비선형의 주동토압을 산정할 수 있는 주

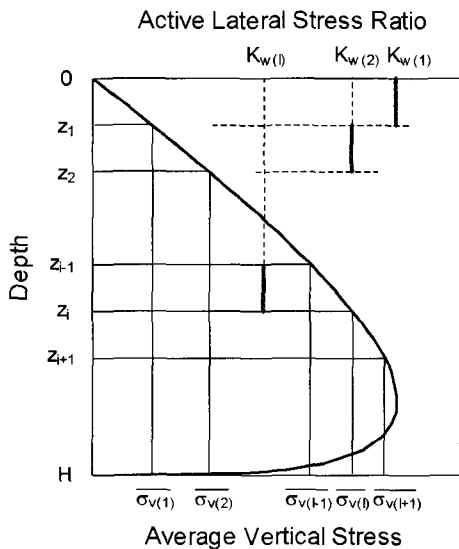


그림 9. 식 (17)과 (20)의 수치적 적분에 사용된 K_w 에 대한 가정

동토압 산정식을 제안하였으며, 이 제안식에는 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과와 함께 사석과 모래의 내부 마찰각과 단위중량, 사석의 뒷채움 경사각 등의 영향이 고려되었다. 이 제안식을 이용하면 뒷채움재가 균질한 경우 뿐만 아니라 케이슨과 같이 뒷채움재가 균질하지 않은 경우에 대해서도 아칭효과를 고려해서 강성 벽체에 작용하는 비선형의 주동토압을 산정하는 것이 가능하다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 학술진흥재단 선도연구자 지원사업의 연구비 지원(KRF-2004-041-D00704)에 의해 이루어진 것으로, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 백규호 (2003), “평행이동하는 강성옹벽에 작용하는 비선형 주동토압 : I. 정식화”, *한국지반공학회 논문집*, 제19권 제1호, pp.181-189.
2. 北島昭一, 阪本 浩, 岸 正平, 中野拓治, 柿崎秀作 (1967), “港灣構造物設計基準作成にあつての諸問題點について”, *港灣技研資料*, No.30, pp.32-43.
3. Fang, Y. and Ishibashi, I. (1986), “Static Earth Pressures with Various Wall Movements”, *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol.112, No.3, pp.317-333.
4. Handy, R.L. (1985), “The Arch in Soil Arching”, *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol.111, No.3, pp.302-318.
5. Harrop-Williams, K. O. (1989), “Geostatic Wall Pressures”, *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol.115, No.9, pp.1321-1325.
6. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Willey and Sons, New York, N.K.
7. Tsagareli, Z. V. (1965), “Experimental Investigation of the Pressure of a Loose Medium on Retaining Walls with a Vertical Back Face and Horizontal Backfill Surface”, *J. Soil Mech. and Found. Eng., ASCE*, Vol.91, No.4, pp.197-200.
8. Wang, Y. Z. (2000), “Distribution of Earth Pressure on a Retaining Wall”, *Geotechnique*, Vol.50, No.1, pp.83-88.

(접수일자 2005. 10. 10, 심사완료일 2006. 2. 6)