

사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 작용하는 주동토압 (II) : 검증과 적용

Active Earth Pressure Against Caisson Backfilled with Crushed Rock and Sand (II) : Verification and Application

백 규 호¹ Paik, Kyu-Ho

Abstract

In the companion paper (Paik, 2006), a new formulation for calculating the nonlinearly distributed active earth pressure acting on a caisson backfilled with crushed rock and sand is proposed, and it takes into account arching effects as well as difference in internal friction angles and unit weights between sand and crushed rock. In this study, in order to partially check the accuracy of the proposed equation, the results of the proposed equation are compared with the equation proposed by Paik (2003a) for caissons with rough surface and homogeneous backfill, and are compared with results of Rankine's theory for caissons with smooth surface and homogeneous backfill. In addition, a parametric study is performed to investigate the effect of ϕ_r , ϕ_s , δ_r , γ_r , γ_s and β on the magnitude of active earth pressure acting on the caisson, and construction methods for minimizing active earth pressure on the caisson are also provided based on the results of a parametric study.

요 지

동반 논문(백규호, 2006)에서 사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 대하여 모래와 사석의 내부마찰각과 단위중량의 차이는 물론 사석의 뒷채움 경사각 변화와 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과까지 고려해서 비선형의 주동토압을 산정할 수 있는 토압산정식이 제안되었다. 본 연구에서는 새로 제안된 토압산정식에 대한 정확도를 검증하기 위하여 뒷채움재가 균질하고 벽체가 거친 경우에 대한 제안식의 결과는 백규호(2003a)의 제안식과 비교하였고, 뒷채움재가 균질하고 벽체가 매끄러운 경우에 대한 제안식의 결과는 Rankine의 토압이론과 비교되었다. 그리고 매개변수 분석을 통해서 사석과 모래의 내부마찰각과 단위중량, 케이슨의 벽면마찰각, 사석의 뒷채움 경사각 변화가 케이슨에 작용하는 주동토압에 미치는 영향을 조사하였으며, 매개변수 분석 결과에 근거해서 케이슨에 작용하는 주동토압을 최소화할 수 있는 뒷채움 시공법이 제안되었다.

Keywords : Caisson, New formulation, Nonhomogeneous backfill, Nonlinear active earth pressure, Optimum backfilling method, Parametric study

1. 서 론

일반적으로 강성 벽체에 작용하는 주동토압은 토압의 분포형태를 삼각형으로 가정하는 Coulomb의 토압이

론이나 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과를 고려함으로써 비선형의 토압분포를 산정할 수 있는 Handy(1985)나 Harrop-Williams(1989), Wang(2000), 백규호(2003a)의 토압산정식을 이용해서 산정할 수 있다. 그러나 아칭효

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 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

과를 고려하지 않는 Coulomb의 토압이론이나 아칭효과를 고려해서 토압을 산정하는 다양한 형태의 제안식은 모두 강성 벽체의 뒷채움재가 균질(homogeneous)한 경우에만 적용할 수 있는 것으로, 그림 1에 보이는 케이슨과 같이 뒷채움재가 불균질(nonhomogeneous)한 경우에 대해서는 적용이 불가능하다. 따라서 실무에서는 케이슨이 사석과 모래로 뒷채움되어 있음에도 불구하고 사석으로만 뒷채움되었다는 가정 하에 Coulomb의 토압이론을 적용해서 케이슨에 작용하는 주동토압을 산정하고 있는 실정이다.

한편, 사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 대하여 케이슨이 평행이동할 때 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과를 고려해서 비선형의 토압분포를 산정할 수 있는 주동토압 산정식이 동반 논문(백규호, 2006)에서 제안되었다. 새로 제안된 토압산정식은 그림 2와 같이 뒷채움재의 파괴면이 수평과 $45^\circ + \phi/2$ 의 각도를 이루므로써 사석과 모래에서 경사를 달리하는 두개의 직선으로 이루어진다는 가정 하에 유도되었다. 그리고 토압산정식을 유도하는 과정에서 케이슨의 뒷채움재로 사용되는 사석과 모래의 단위중량과 내부마찰각의 차이는 물론 사석의 뒷채움 경사각 변화와 아칭효과로 인한 뒷채움재의 응력상태 변화도 고려되었다. 따라서 새로운 토압산정식을 이용하면 케이슨과 같이 뒷채움재가 불균질한 경우는 물론 육상에 축조된 옹벽과 같이 뒷채움재가 균질한 경우에 대해서도 아칭효과를 고려해서 비선형의 주동토압을 산정하는 것이 가능하다.

이처럼 다양한 영향인자들을 고려해서 이론적으로 유도된 토압산정식을 실무에 적용하기 위해서는 제안식에 대한 타당성과 정확성이 검증되어야 하며, 그러기 위해서는 다양한 뒷채움 조건하에서 케이슨에 작용하는 주

동토압을 측정된 시험결과가 필요하다. 그러나 현재까지 사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 대하여 주동토압의 크기와 분포형태를 측정된 시험결과는 보고된 바 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 동반 논문(백규호, 2006)에서 제안된 토압산정식의 정확도를 부분적으로라도 검증하기 위하여 케이슨의 벽면이 거친 상태에서 배면이 각각 모래($\beta=0^\circ$)나 사석($\beta=90^\circ$)으로만 뒷채움된 경우에 대해서 제안식으로부터 얻어진 결과를 뒷채움재가 균질한 경우에 대해서 비선형의 주동토압을 산정할 수 있는 백규호(2003a)의 제안식과 비교하였다. 그리고 뒷채움재가 균질하고 케이슨의 벽면이 매끄러운 경우($\delta=0^\circ$)에 대해서 얻어진 제안식의 결과는 Rankine 이론의 결과와 비교되었다. 뿐만 아니라 케이슨의 뒷채움재로 사용되는 사석과 모래의 토질특성(단위중량과 내부마찰각)과 사석의 뒷채움 경사각(β), 케이슨의 벽면마찰각 등이 케이슨에 작용하는 주동토압에 미치는 영향을 조사하기 위하여 매개변수 분석을 수행하였으며, 매개변수 분석의 결과에 근거해서 케이슨에 작용하는 토압을 최소화할 수 있는 뒷채움 방법을 제시하였다.

2. 기존 토압이론과의 비교를 통한 제안식의 정확도 검증

2.1 뒷채움재가 균질하고 벽면이 거친 경우

(1) 모래만으로 뒷채움된 경우($\beta=0^\circ$)

케이슨의 배면이 모래로만 뒷채움되어 있으면 그림 2에서 사석의 뒷채움 경사각은 $\beta=0^\circ$ 이 된다. 이 값을 동반 논문(백규호, 2006)의 식 (2)에 대입하면 사석의 경

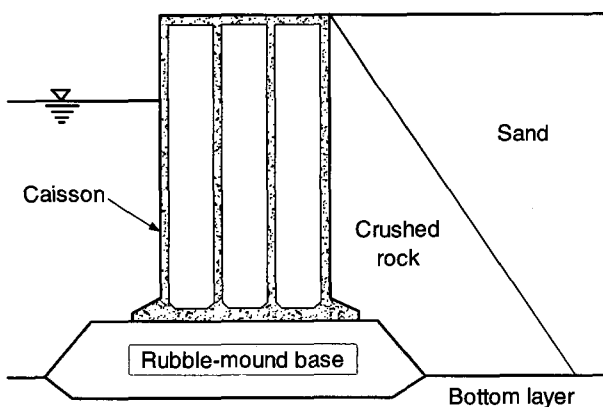


그림 1. 케이슨의 뒷채움 형태

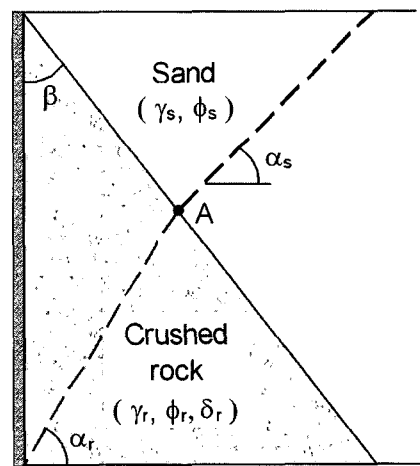


그림 2. 케이슨의 뒷채움재에서 파괴면의 형상

사면과 파괴면이 교차하는 지점(A점)의 깊이(H_1)는 $H_1 = H$ 이 되고, 동반 논문의 식 (15)에 대입하면 $\theta_{ij} = \theta_{cj}$ 이 얻어진다. 여기서 $j=s$ 일 때는 모래 영역에 대한 값을 나타내며, $j=r$ 일 때는 사석 영역에 대한 값을 나타내므로 이 결과는 식 (1)과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$\theta_{is} = \theta_{cs} \text{와 } \theta_{ir} = \theta_{cr} \quad (1)$$

한편, 식 (1)을 동반 논문의 식 (8)에 대입해서 얻어진 결과를 동반 논문의 식 (7)에 대입하면 임의의 깊이 z 에서 주응력의 회전을 고려한 케이슨에 작용하는 수평응력 σ_{hw} 이 다음과 같이 구해진다.

$$\sigma_{hw} = \sigma_{hw(s)} = (\gamma_s z) (\cos^2 \theta_{cs} + K_s \sin^2 \theta_{cs}) \quad (2)$$

여기서, θ_{cs} 는 케이슨 벽면에서 주응력의 회전각으로 동반 논문의 식 (13)에서 아래첨자에 $j=s$ 를 대입함으로써 식 (3)과 같이 계산되며, K_s 는 최대주응력과 최소주응력의 비로써 $K_s = \tan^2(45 - \phi_s/2)$ 로 계산된다.

$$\theta_{cs} = \tan^{-1} \left[\frac{(1 - K_s) + \sqrt{(1 - K_s)^2 - 4K_s \tan^2 \delta_s}}{2K_s \tan \delta_s} \right] \quad (3)$$

그리고 깊이 z 에 존재하는 미소수평요소에 작용하는 평균 연직응력은 동반 논문의 식 (11)에 식 (1)을 대입함으로써 식 (4)와 같이 구해진다.

$$\bar{\sigma}_v = \gamma_s z \left(1 - \frac{1 - K_s}{3} \cos^2 \theta_{cs} \right) \quad (4)$$

따라서 뒷채움재에서 발생하는 주응력의 회전을 고려한 미소수평요소에 대한 토압계수는 식 (2)를 식 (4)로 나눔으로써 다음과 같이 계산된다.

$$K_w = \frac{\sigma_{hw}}{\bar{\sigma}_v} = \frac{3(\cos^2 \theta_{cs} + K_s \sin^2 \theta_{cs})}{3 - (1 - K_s) \cos^2 \theta_{cs}} \quad (5)$$

미소수평요소에 작용하는 마찰력의 누적효과(accumulative effect)가 고려된 임의의 깊이 z_i 에 작용하는 평균 연직응력은 동반 논문의 식 (18)에 $\beta=0^\circ$ 와 경계조건($z_{i-1}=0$ 에서 $\bar{\sigma}_{v(i-1)}=0$)을 대입함으로써 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$\bar{\sigma}_{v(i)} = \frac{H - z_i}{m_i} \left[\left(\frac{H}{H - z_i} \right)^{m_i} \gamma_s - \gamma_s \right] \quad (6)$$

그리고 이 식에 $m_i = 1 - K_{w(i)} \tan \alpha_s \tan \delta_s$ 을 대입한 후 식 (5)의 토압계수 K_w 를 곱하면 야칭효과가 고려된 케이슨에 작용하는 수평주동응력이 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ahw(i)} &= K_{w(i)} \bar{\sigma}_{v(i)} \\ &= \frac{\gamma_s H K_{w(i)}}{1 - K_{w(i)} \tan \alpha_s \tan \delta_s} \left[\left(1 - \frac{z_i}{H} \right)^{K_{w(i)} \tan \alpha_s \tan \delta_s} - \left(1 - \frac{z_i}{H} \right) \right] \quad (7) \end{aligned}$$

이상에서 유도된 것과 같이 $\beta=0^\circ$ 일 때 케이슨에 작용하는 주동토압의 산정을 위한 제안식은 뒷채움재가 균질한 강성 벽체에 대하여 실측치에 근접한 주동토압의 크기와 분포형태를 산정하는 백규호(2003a)의 제안식과 동일하게 된다. 따라서 동반 논문에서 제안된 토압산정식은 $\beta=0^\circ$ 이고 벽체가 거친 경우에 대하여 비교적 정확한 주동토압 크기와 토압분포를 제공하는 것으로 나타났다.

(2) 사석으로만 뒷채움된 경우($\beta=90^\circ$)

케이슨의 배면이 사석으로만 뒷채움된 경우 사석의 뒷채움 경사각은 $\beta=90^\circ$ 가 되며, 이 때 뒷채움재의 지표면으로부터 사석의 경사면과 파괴면의 교점(A점)까지의 거리(H_1)는 동반 논문(백규호, 2006)의 식 (2)로부터 $H_1=0$ 이 된다. 그리고 사석의 경사면과 미소수평요소가 교차하는 지점에 작용하는 주응력의 회전각 θ_{ij} 는 동반 논문에서 언급하였듯이 $\theta_{ij}=90^\circ$, 즉 $\theta_{is}=\theta_{ir}=90^\circ$ 가 된다. 따라서 임의의 깊이 z 에서 주응력의 회전을 고려한 케이슨에 작용하는 수평응력은 동반 논문의 식 (8)에 $\theta_{ij}=90^\circ$ 를 대입한 후 그 결과를 동반 논문의 식 (7)에 적용하면 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_{hw} = \sigma_{hw(r)} = (\gamma_r z) (\cos^2 \theta_{cr} + K_s \sin^2 \theta_{cr}) \quad (8)$$

여기서, θ_{cr} 은 케이슨 벽면에서 뒷채움재에 작용하는 주응력의 회전각으로 동반 논문의 식 (13)에서 아래첨자에 $j=r$ 를 대입함으로써 식 (9)과 같이 얻을 수 있다.

$$\theta_{cr} = \tan^{-1} \left[\frac{(1 - K_r) + \sqrt{(1 - K_r)^2 - 4K_r \tan^2 \delta_r}}{2K_r \tan^2 \delta_r} \right] \quad (9)$$

그리고 깊이 z 에 존재하는 미소수평요소에 작용하는 평균 연직응력은 동반 논문의 식 (12)에 $\beta=90^\circ$, 즉 $1/\tan \beta=0$ 을 대입함으로써 식 (10)과 같이 구해진다.

$$\bar{\sigma}_v = \gamma_r z \left(1 - \frac{1 - K_r}{3} \cos^2 \theta_{cr} \right) \quad (10)$$

따라서 아칭효과로 인해 뒷채움재에서 발생하는 주응력의 회전을 고려한 미소수평요소에 대한 토압계수는 식 (11)과 같이 계산된다.

$$K_w = \frac{\sigma_{hw}}{\bar{\sigma}_v} = \frac{3(\cos^2 \theta_{cr} + K_r \sin^2 \theta_{cr})}{3 - (1 - K_r) \cos^2 \theta_{cr}} \quad (11)$$

또한 미소수평요소의 누적효과가 고려된 임의의 깊이 z_i 에서 미소수평요소에 작용하는 평균 연직응력은 동반 논문의 식 (21)에 경계조건($z_{i-1} = 0$ 에서 $\bar{\sigma}_{v(i-1)} = 0$)을 대입함으로써 식 (12)와 같이 구해지고,

$$\bar{\sigma}_{v(i)} = \left(\frac{H - z_i}{H} \right)^{1 - n_i} \frac{\gamma_r}{n_i} H - \frac{\gamma_r}{n_i} (H - z_i) \quad (12)$$

식 (12)에 식 (11)의 토압계수를 곱한 후 $n_i = 1 - K_{w(i)} \tan \alpha_r \tan \delta_r$ 을 대입하면 깊이 z_i 에서 케이슨에 작용하는 수평주동응력은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ahw(i)} &= K_{w(i)} \bar{\sigma}_{v(i)} \\ &= \frac{\gamma_r H K_{w(i)}}{1 - K_{w(i)} \tan \alpha_r \tan \delta_r} \left[\left(1 - \frac{z_i}{H} \right)^{K_{w(i)} \tan \alpha_r \tan \delta_r} - \left(1 - \frac{z_i}{H} \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

이처럼 $\beta = 90^\circ$ 인 경우에도 제안된 토압산정식은 백규호(2003a)의 토압산정식과 동일하다. 따라서 사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 대한 주동토압 산정식은 $\beta = 90^\circ$ 의 경우에도 실측치에 매우 근접한 예측치를 제공함을 알 수 있다.

2.2 뒷채움재가 균질하고 벽면이 매끄러운 경우

일반적으로 강성 벽체의 뒷채움재가 균질하고 벽면이 매끈한 경우($\delta = 0$)에 벽체에 작용하는 주동토압은 Rankine의 토압이론에 의해 산정된다. 따라서 케이슨의 배면이 사석과 모래 중 하나로 뒷채움($\beta = 0^\circ$ 혹은 90°)되고 케이슨의 벽면이 매끄러운 경우($\delta_s = 0$ 혹은 $\delta_r = 0$)에 동반 논문에서 제안된 토압산정식의 결과가 Rankine의 토압이론으로부터 얻어진 결과와 일치하는지의 여부를 통해서 케이슨에 대한 토압산정식의 정확도를 부분적으로 검증하는 것이 가능하다.

이를 위하여 케이슨의 배면이 모래나 사석 중 하나로 뒷채움되었을 때 임의의 깊이 z_i 에서 케이슨에 작용하

는 수평주동응력은 식 (7)과 (13)에 각각 $\delta_s = 0$ 과 $\delta_r = 0$ 을 대입함으로써 식 (14)와 같이 계산된다.

$$\beta = 0^\circ \text{인 경우 } \sigma_{ahw(i)} = \gamma_s z_i K_{w(i)} \quad (14a)$$

$$\beta = 90^\circ \text{인 경우 } \sigma_{ahw(i)} = \gamma_r z_i K_{w(i)} \quad (14b)$$

그리고 케이슨의 배면이 모래 혹은 사석만으로 뒷채움된 경우에 케이슨의 벽면에 작용하는 주응력의 회전각(θ_{cs} 와 θ_{cr})은 식 (3)과 (9)에 각각 $\delta_s = 0$ 과 $\delta_r = 0$ 을 대입함으로써 $\theta_{cs} = \theta_{cr} = 90^\circ$ 으로 계산된다. 따라서 이러한 주응력 회전각들을 주응력의 회전이 고려된 미소수평요소에 대한 토압계수 산정식인 식 (5)와 (11)에 대입하면 토압계수는 식 (15)와 같이 구해진다.

$$\beta = 0^\circ \text{인 경우 } K_{w(i)} = K_s \quad (15a)$$

$$\beta = 90^\circ \text{인 경우 } K_{w(i)} = K_r \quad (15b)$$

이상에 유도된 바와 같이 케이슨의 배면이 모래나 사석 중 한가지로만 뒷채움되고 케이슨의 벽면이 매끄러운 경우에 동반 논문에서 제안된 토압산정식으로부터 얻어지는 토압결과는 Rankine의 토압이론으로부터 얻어지는 결과와 같았다. 따라서 동반 논문에서 제안된 케이슨에 대한 토압산정식은 케이슨의 벽면이 매끄러운 경우에 대해서도 정확한 결과를 제공하는 것으로 나타났다.

3. 매개변수 분석

3.1 뒷채움재의 내부마찰각

그림 3은 케이슨의 높이(H)가 20m이고 벽면마찰각이 $\delta_r = 0.8\phi_r$ (단, $\beta = 0^\circ$ 일 때는 $\delta_r = 0.8\phi_s$)이며, 사석과 모래의 단위중량은 각각 22kN/m^3 과 18kN/m^3 이고 사석의 내부마찰각이 $\phi_r = 43^\circ$ 일 때 모래의 내부마찰각(ϕ_s)이 케이슨에 작용하는 주동토압의 크기와 작용점 높이에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림 3(a)와 같이 사석의 뒷채움 경사각(β)이 일정할 때 케이슨에 작용하는 수평주동토압의 크기는 모래의 내부마찰각(ϕ_s)이 커짐에 따라 감소하였으며, $\beta = 90^\circ$ 일 때는 뒷채움재가 사석만으로 이루어져 있기 때문에 케이슨에 작용하는 토압이 ϕ_s 와 무관하게 일정함하게 유지됨을 확인할 수 있다. 그리고 모래의 내부마찰각에 따른 주동토압의 감소율은 사석의 뒷채움 경사각이 커질수록 작아졌으며, β 가 30° 를

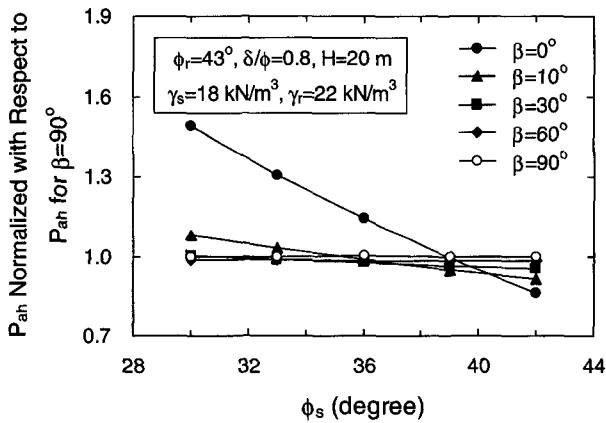
넘어서면서 급격히 작아지는 경향을 보였다. 이러한 경향은 다음에 언급될 β 에 따른 주동토압의 변화에서 더욱 분명하게 볼 수 있다. 또한 $\phi_s < 36^\circ$ 일 때는 β 가 커질수록 주동토압이 감소하였으나, $\phi_s > 39^\circ$ 일 때는 β 가 커질수록 주동토압도 증가하는 것으로 나타났다.

그림 3(b)와 같이 케이슨에 작용하는 주동토압은 사석의 뒷채움 경사각과 모래의 내부마찰각에 따라 케이슨의 저점으로부터 $0.38H \sim 0.42H$ 의 높이에 작용하는 것으로 나타났다. 이것으로부터 제안식에 의해 산정된 주동토압은 삼각형이 아닌 비선형으로 분포함으로 알 수 있다. 그리고 $\beta > 0^\circ$ 일 때 케이슨에 작용하는 주동토압의 작용점 높이는 모래의 내부마찰각이 커짐에 따라 선형으로 감소하였으며, $\beta > 10^\circ$ 의 경우 모래의 내부마찰각에 따른 토압의 감소율은 사석의 뒷채움 경사각이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 또한 뒷채움재가 모래로만 이루어진 $\beta = 0^\circ$ 의 경우에는 모래의 내부마찰

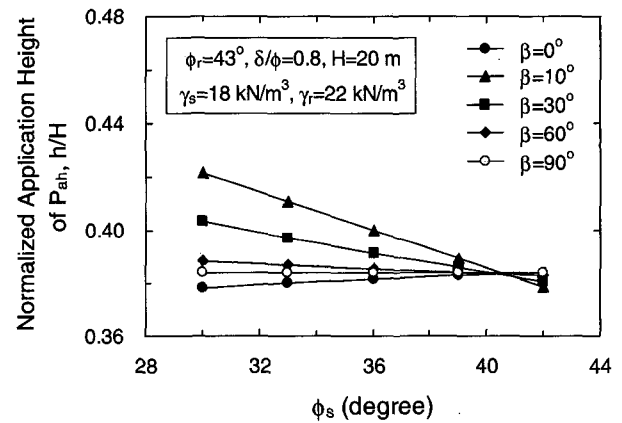
각이 커짐에 따라 케이슨에 작용하는 토압의 작용점 높이도 점차 높아졌으며, 이러한 결과는 백규호(2003b)의 연구결과와 일치하는 것이다.

한편, 그림 4는 모래의 내부마찰각이 36° 이고 기타 조건은 그림 3의 경우와 동일할 때 사석의 내부마찰각에 따른 주동토압의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4(a)와 같이 $\beta = 0^\circ$ 일 때는 뒷채움재가 모래로만 구성되어 있기 때문에 케이슨에 작용하는 주동토압의 크기는 사석의 내부마찰각(ϕ_r)과 무관하게 일정하였다. $\beta > 0^\circ$ 의 경우에는 사석의 내부마찰각(ϕ_r)이 커짐에 따라 주동토압의 크기는 거의 선형적으로 감소하였으며, ϕ_r 에 따른 주동토압의 변화율은 사석의 뒷채움 경사각(β)이 증가함에 따라 커지는 것으로 나타났다.

사석의 내부마찰각에 따른 주동토압의 작용점 변화를 나타낸 그림 4(b)에서 보이듯이 $\beta > 0^\circ$ 의 경우 토압의 작용점 높이는 사석의 내부마찰각이 커짐에 따라 높

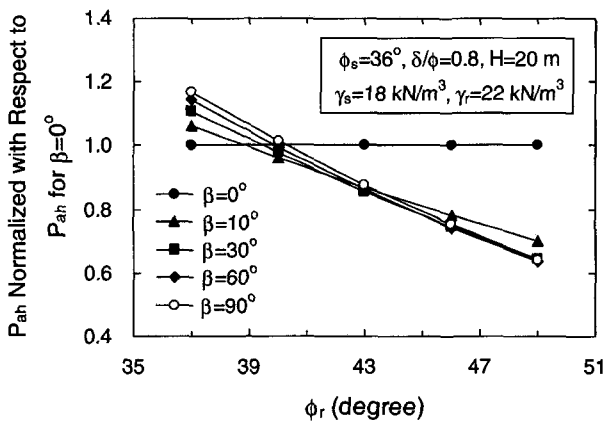


(a) 수평주동토압의 크기

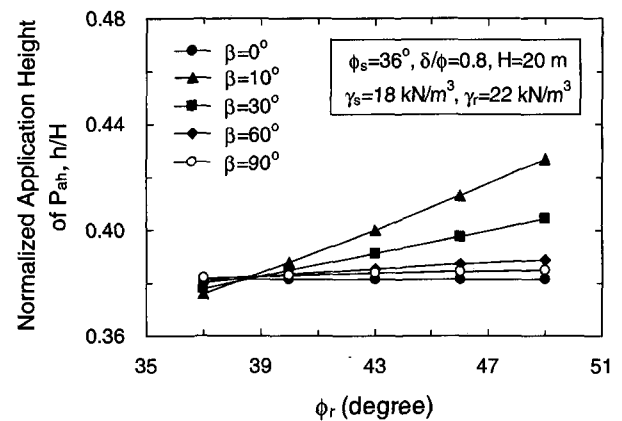


(b) 토압의 작용점 높이

그림 3. 모래의 내부마찰각이 주동토압에 미치는 영향



(a) 수평주동토압의 크기



(b) 토압의 작용점 높이

그림 4. 사석의 내부마찰각이 주동토압에 미치는 영향

아졌으며, $\beta > 10^\circ$ 인 경우 사석의 내부마찰각에 따른 작용점 높이의 변화율은 사석의 뒷채움 경사각이 커질수록 감소하는 경향을 보였다. 그리고 $\beta = 0^\circ$ 일 때는 뒷채움재가 모래로만 구성되기 때문에 토압의 작용점 높이는 사석의 내부마찰각과 관계없이 일정하게 유지되는 것을 그림에서 확인할 수 있다.

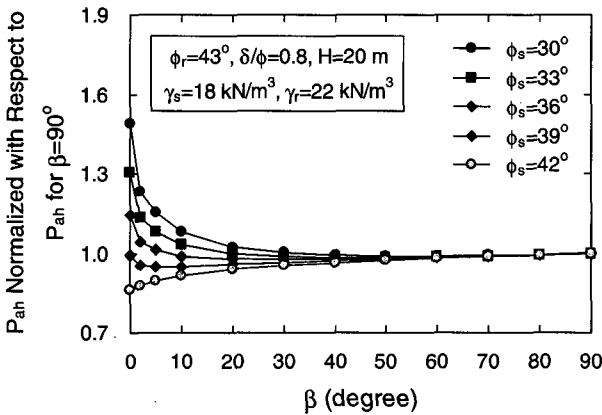
3.2 사석의 뒷채움 경사각

그림 5는 케이슨의 벽면마찰각이 $\delta = 0.8\phi_r$ (단, $\beta = 0^\circ$ 일 때는 $\delta = 0.8\phi_s$)이고 사석과 모래의 단위중량은 각각 22kN/m^3 와 18kN/m^3 이며, 사석의 내부마찰각이 $\phi_r = 43^\circ$ 이고 모래의 내부마찰각(ϕ_s)이 $30^\circ \sim 42^\circ$ 일 때 사석의 뒷채움 경사각(β)에 따른 케이슨에 작용하는 주동토압의 변화를 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 보듯이 $\phi_s \leq 39^\circ$ 의 경우 케이슨에 작용하는 주동토압은 β 가 증가함에 따라 급격히 감소하다가 β 가 일정한 값보다 커지면 주동토압

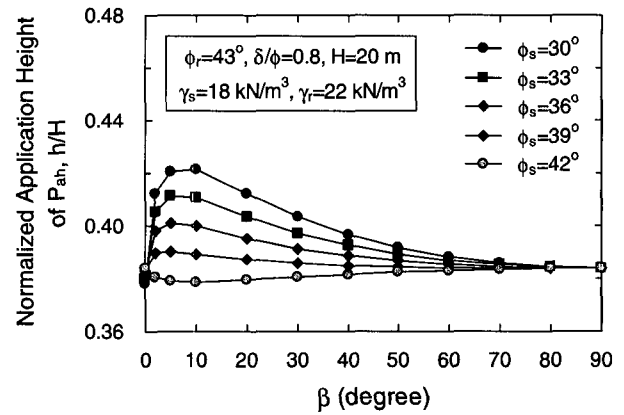
이 점차 증가하는 경향을 보였다. 그리고 β 에 따른 주동토압의 변화가 감소에서 증가로 반전되는 β 값은 ϕ_s 가 커짐에 따라 작아지는 것으로 나타났다. 또한 모래의 내부마찰각에 따른 주동토압의 변화는 β 가 증가함에 따라 급격히 감소하였으며, $\beta \geq 40^\circ$ 일 때는 ϕ_s 에 따른 주동토압의 변화율이 매우 작은 것으로 나타났다.

한편, 그림 5(b)와 같이 $\phi_s \leq 39^\circ$ 인 경우 케이슨에 작용하는 주동토압의 작용점 높이는 β 가 증가함에 따라 급격히 증가하다가 β 가 $5^\circ \sim 10^\circ$ 를 넘어서면서 서서히 감소하는 경향을 보였다. 반면 $\phi_s \geq 42^\circ$ 인 경우에는 β 가 증가함에 따라 주동토압의 작용점 높이가 감소하다가 β 가 5° 를 넘어서면서 서서히 증가하였다. 또한 모래의 내부마찰각에 따른 주동토압 작용점 높이의 변화율은 β 가 $5^\circ \sim 10^\circ$ 일 때 가장 크며, β 가 증가함에 따라 작아져서 $\beta = 90^\circ$ 에서는 작용점 높이의 변화율이 0에 도달하는 것으로 나타났다.

그림 6은 모래의 내부마찰각이 $\phi_s = 36^\circ$ 이고 사석의

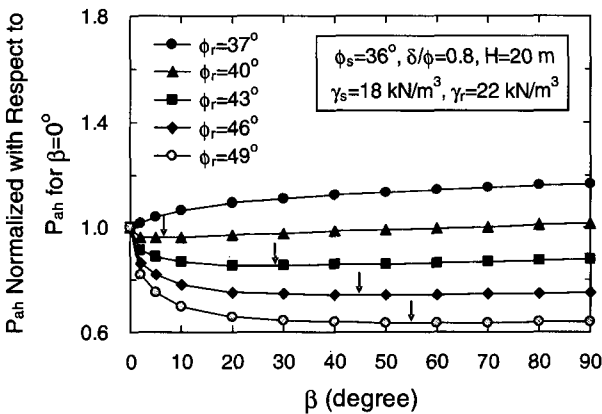


(a) 수평주동토압의 크기

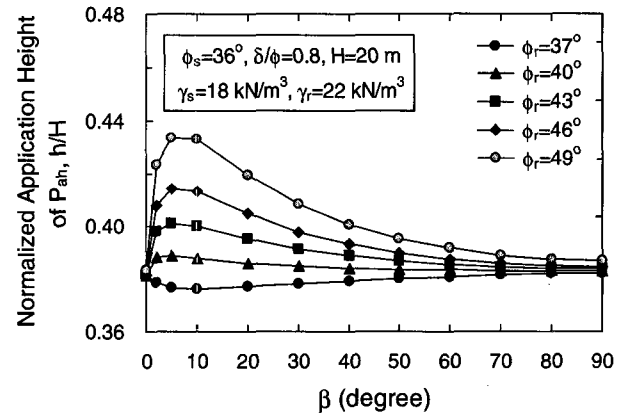


(b) 토압의 작용점 높이

그림 5. 모래의 내부마찰각에 따른 사석의 뒷채움 경사각이 주동토압에 미치는 영향

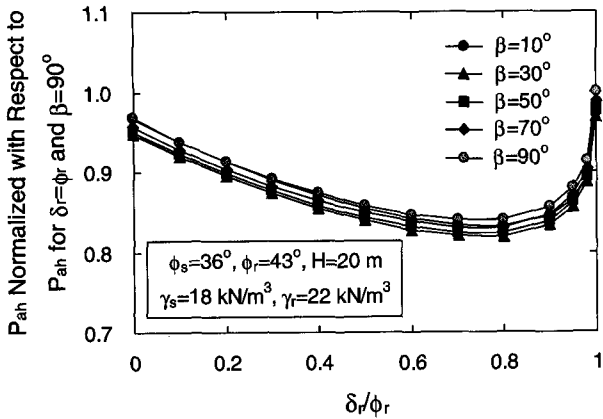


(a) 수평주동토압의 크기

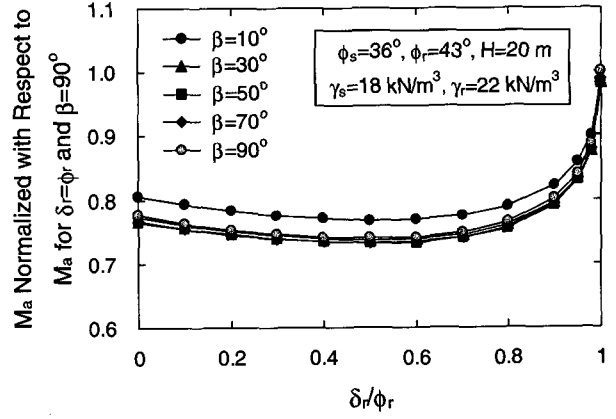


(b) 토압의 작용점 높이

그림 6. 사석의 내부마찰각에 따른 사석의 뒷채움 경사각이 주동토압에 미치는 영향



(a) 수평주동토압의 크기



(b) 모멘트의 크기

그림 7. 케이슨의 벽면마찰각이 주동토압과 모멘트에 미치는 영향

내부마찰각(ϕ_r)이 $37^\circ \sim 49^\circ$ 일 때 β 에 따른 케이슨에 작용하는 주동토압의 변화를 나타낸 것으로, 그림에서 \downarrow 는 주동토압이 최소가 되는 지점을 표시한 것이다. 그림 6(a)에서 보듯이 $\phi_r \leq 37^\circ$ 일 때는 β 가 커짐에 따라 주동토압 증가하였으나 $\phi_r \geq 40^\circ$ 일 때는 β 가 커짐에 따라 주동토압이 급격히 감소하다가 β 가 일정한 값을 넘어서면서 증가세로 반전하는 경향을 보였다. 그리고 $\phi_r \geq 40^\circ$ 일 때 β 에 따라 주동토압이 감소에서 증가로 반전되는 β 값은 ϕ_r 이 증가함에 따라 커지는 것으로 나타났다.

케이슨에 작용하는 주동토압의 작용점 높이도 주동토압 크기의 경우와 마찬가지로 사석의 내부마찰각에 따라 달라진다. 그림 6(b)와 같이 $\phi_r \geq 40^\circ$ 인 경우 토압의 작용점 높이는 β 가 증가함에 따라 급격히 증가하다가 β 가 $5^\circ \sim 10^\circ$ 를 넘어서면서 감소하는 경향을 보인다. 그러나 $\phi_r \leq 37^\circ$ 인 경우에는 β 가 증가함에 따라 초반에는 감소하다가 β 가 5° 를 넘어서면서 서서히 증가하였다.

3.3 케이슨의 벽면마찰각

그림 7은 사석과 모래의 내부마찰각이 각각 43° 와 36° , 단위중량이 각각 22kN/m^3 과 18kN/m^3 이고 사석의 뒷채움 경사각(β)이 $10^\circ \sim 90^\circ$ 까지 변할 때 케이슨의 벽면마찰각이 주동토압과 모멘트의 크기에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림 7(a)와 같이 케이슨에 작용하는 주동토압은 사석의 뒷채움 경사각과 무관하게 $\delta_r = 0.7 \sim 0.8\phi_r$ 에서 최소가 되었다. 케이슨의 벽면마찰각이 이 값보다 작아지거나 커지면 주동토압이 급격히 커지는 경향을 보였다. 반면 그림 7(b)에 보이듯이 케이슨에 작용하는

모멘트는 $\delta_r = 0.5\phi_r$ 에서 최소가 되지만 $\delta_r = 0.4 \sim 0.7\phi_r$ 의 범위에서는 그 크기의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 이상의 해석결과를 종합할 때 케이슨에 작용하는 토압과 모멘트를 최소로 하기 위해서는 사석의 뒷채움 경사각과 무관하게 케이슨의 벽면마찰각을 $\delta_r = 0.7\phi_r$ 로 하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

그림 8은 케이슨의 벽면마찰각에 따른 주동토압의 분포형태 변화를 보인 것이다. 그림에서 보듯이 케이슨의 벽면이 매끄러운 경우($\delta_r = 0^\circ$)에 주동토압은 삼각형 분포로 작용하며, 이것은 Rankin의 토압이론으로부터 얻어지는 토압분포와도 일치하는 결과이다. 그리고 케이슨의 벽면마찰각(δ_r)이 커질수록 주동토압의 분포형태는 삼각형에서 비선형으로 변하면서 주동토압의 작용점 높이가 점차 높아지는 경향을 보였다.

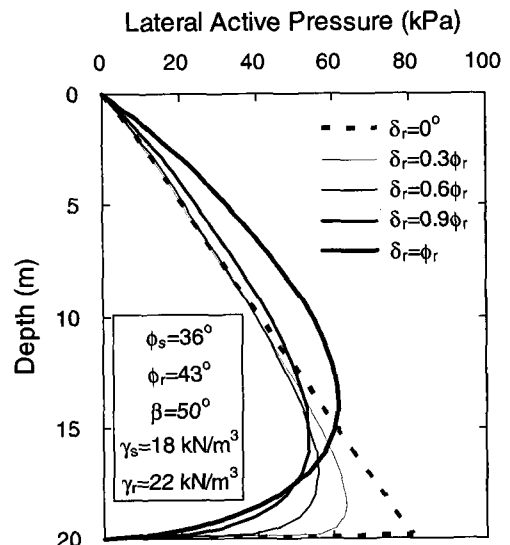


그림 8. 케이슨의 벽면마찰각이 주동토압 분포에 미치는 영향

3.4 뒷채움재의 단위중량

그림 9는 케이슨의 뒷채움재로 사용되는 사석과 모래의 내부마찰각이 각각 43° 와 36° 이고 케이슨의 벽면마찰각이 $\delta_r = 0.8\phi_r$ (단, $\beta = 0^\circ$ 일 때는 $\delta_r = 0.8\phi_s$)이며, 사석의 단위중량이 $\gamma_r = 22\text{kN/m}^3$ 일 때 모래의 단위중량 변화가 케이슨에 작용하는 주동토압에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 해석결과에 따르면 그림 9(a)와 같이 주동토압은 모래의 단위중량(γ_s)이 커짐에 따라 증가하였으며, γ_s 에 따른 주동토압의 변화율은 사석의 뒷채움 경사각(β)이 커질수록 작아져서 케이슨의 배면이 사석으로만 뒷채움되는 $\beta = 90^\circ$ 의 경우에는 케이슨에 작용하는 주동토압이 γ_s 와 무관하게 일정하게 유지되었다. 그리고 $\gamma_r = 22\text{kN/m}^3$ 이고 $\beta \geq 10^\circ$ 일 때 $\gamma_s < 18\text{kN/m}^3$ 이면 β 가 커질수록 토압이 증가하지만 $\gamma_s > 19\text{kN/m}^3$ 이면 β 가 커질수록 토압은 감소하는 경향을 보였다.

한편, 그림 9(b)와 같이 $0 < \beta < 90^\circ$ 인 경우 케이슨에 작용하는 주동토압의 작용점 높이는 β 의 크기와 무관하게 모래의 단위중량이 커질수록 증가하였으며, 모래의 단위중량이 커질수록 β 에 따른 토압 작용점 높이의 변화가 커지는 것으로 나타났다. 그리고 케이슨의 배면이 사석으로만 뒷채움되는 $\beta = 90^\circ$ 의 경우에 토압의 작용점 높이는 모래의 단위중량과 무관하게 일정하게 유지된다는 것을 확인할 수 있다. 또한 뒷채움재가 모래로만 구성된 $\beta = 0^\circ$ 의 경우보다 사석으로만 구성된 $\beta = 90^\circ$ 의 경우에 케이슨에 작용하는 주동토압의 작용점 높이가 더 높다는 것을 그림으로부터 알 수 있으며, 이러한 결과는 뒷채움재가 균질한 경우 뒷채움재의 내부마찰각이 클수록 토압의 작용점 높이가 더 높아진다는 사실

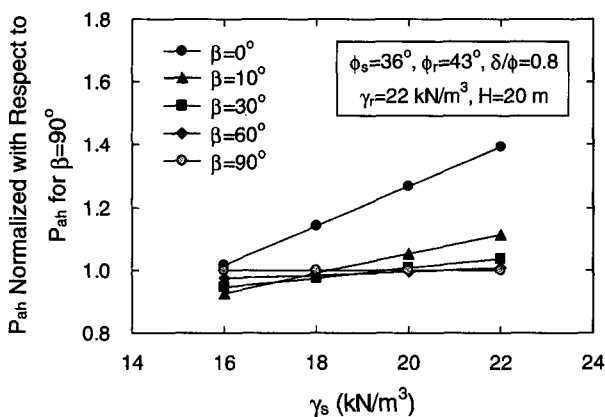
과도 일치한다.

그림 10은 모래의 단위중량이 $\gamma_s = 18\text{kN/m}^3$ 일 때 사석의 단위중량이 케이슨에 작용하는 주동토압에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림 10(a)에서 보듯이 사석의 단위중량(γ_r)이 증가함에 따라 케이슨에 작용하는 주동토압도 증가하였으며, γ_r 의 변화에 따른 주동토압의 증가율은 β 가 커질수록 커지는 경향을 보였다. 또한 케이슨의 배면이 모래로만 뒷채움된 경우($\beta = 0^\circ$)에 주동토압은 사석의 단위중량과 무관하게 일정하게 유지됨을 그림에서 볼 수 있다.

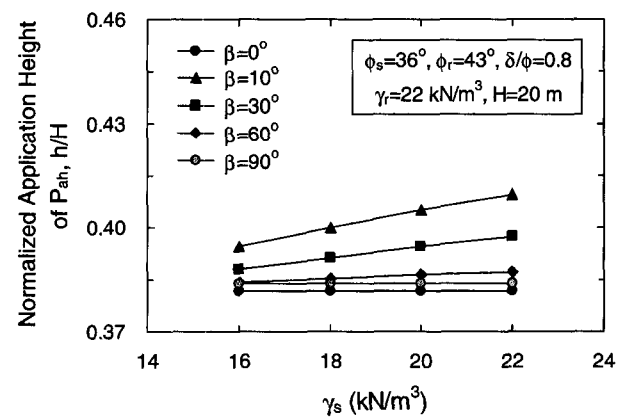
케이슨에 작용하는 주동토압의 작용점 높이는 그림 10(b)에서 보이듯이 γ_r 이 커질수록 낮아졌다. 이것은 토압을 유발하는 흙째기의 하부에 사석이 존재하기 때문에 사석의 단위중량이 커지면 케이슨의 하부에 작용하는 토압이 상대적으로 더 커지기 때문이다. 또한 사석의 단위중량이 커질수록 β 에 따른 토압 작용점 높이의 변화율은 작아지는 것으로 나타났다.

4. 뒷채움재에 대한 최적 시공법

사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 작용하는 주동토압은 사석과 모래의 내부마찰각(ϕ_r 과 ϕ_s)과 단위중량(γ_r 과 γ_s), 사석의 뒷채움 경사각(β), 케이슨의 벽면마찰각(δ_r)에 영향을 받는다. 그리고 일반적으로 조밀한 쇄석의 내부마찰각은 $\phi_r = 36^\circ \sim 45^\circ$ 이고 조밀한 모래의 내부마찰각은 $\phi_s = 30^\circ \sim 35^\circ$ 이다(Tomlinson, 1987). 따라서 케이슨에 작용하는 주동토압을 최소화할 수 있는 뒷채움 방법을 도출하기 위하여 앞 절에서 언급한 매개변수 분석의 결과에 사석과 모래의 일반적인 물성치를 적용

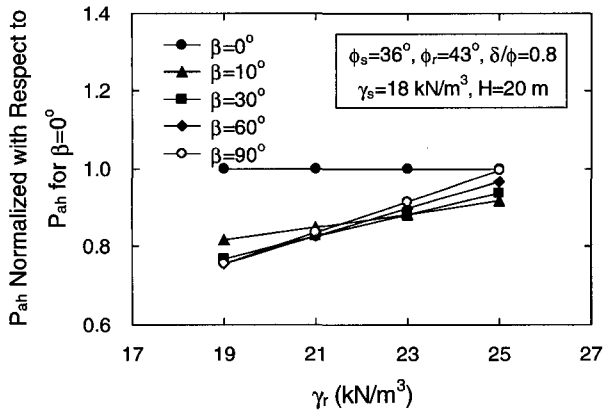


(a) 수평주동토압의 크기

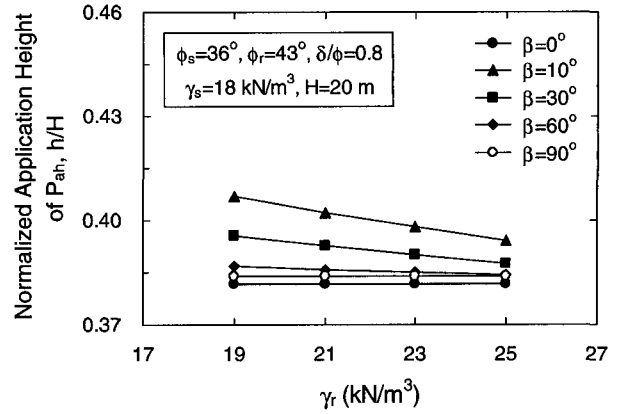


(b) 토압의 작용점 높이

그림 9. 모래의 단위중량이 주동토압에 미치는 영향



(a) 수평주동토압의 크기



(b) 토압의 작용점 높이

그림 10. 사석의 단위중량이 주동토압에 미치는 영향

하였다.

그림 3과 4에 사석과 모래의 일반적인 내부마찰각을 적용한 결과, ϕ_s 와 ϕ_r 이 클수록 케이슨에 작용하는 주동토압의 크기는 작아지고 작용점 높이가 낮아지는 것으로 나타났다. β 에 따른 주동토압의 변화를 나타낸 그림 6(a)에 따르면 $\beta > 10^\circ$ 의 경우 $\phi_r \leq 40^\circ$ 일 때는 β 가 작을수록 그리고 $43^\circ \leq \phi_r \leq 49^\circ$ 일 때는 $28^\circ \leq \beta \leq 55^\circ$ 에서 주동토압이 최소치에 접근하였으며, 토압의 작용점 높이는 β 가 클수록 낮아지는 경향을 보였다. 그리고 그림 7에서는 β 의 크기와 무관하게 케이슨의 벽면마찰각이 $\delta_r = 0.7\phi_r$ 일 때 케이슨에 작용하는 주동토압과 모멘트 모두가 최소치에 가장 근접하였다. 또한 사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 작용하는 주동토압은 사석과 모래의 단위중량이 작아질수록 그 크기가 감소하고, $\beta > 10^\circ$ 의 범위에서는 β 가 커질수록 토압의 작용점 높이가 낮아지는 것을 그림 9와 10에서 알 수 있다. 따라서 이러한 매개변수분석 결과에 근거할 때 사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 작용하는 주동토압의 크기와 작용점 높이를 최소로 하기 위해서는 사석과 모래의 내부마찰각을 극대화하고 단위중량은 최소로 하며, $43^\circ \leq \phi_r \leq 49^\circ$ 일 때 사석의 뒷채움 경사각은 $28^\circ \sim 55^\circ$ 의 범위로 하고 케이슨의 벽면마찰각은 $\delta_r = 0.7\phi_r$ 로 하는 것이 바람직하다.

5. 결론

동반 논문(백규호, 2006)에서는 사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 대하여 뒷채움재로 사용되는 사석과 모래의 내부마찰각과 단위중량은 물론 사석이 뒷채움되

는 경사각의 영향과 케이슨이 변위를 일으킬 때 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과까지 고려함으로써 비선형으로 분포하는 주동토압을 산정할 수 있는 토압산정식을 제안하였다. 본 연구에서는 동반 논문에서 제안된 토압산정식에 대한 정확도를 부분적으로 검증하기 위하여 표면이 거친 케이슨의 배면이 모래나 혹은 사석으로만 뒷채움된 경우에 대하여 새로운 토압산정식을 적용하고, 그로부터 얻어진 결과를 뒷채움재가 균질한 경우에 아칭효과를 고려해서 토압을 산정하는 백규호(2003a)의 제안식과 비교하였다. 또한 제안된 토압산정식을 뒷채움재가 균질하고 케이슨의 벽면이 매끄러운 경우에 적용해서 얻어진 결과를 Rankine의 토압이론에 의한 결과와 비교하였다. 그 결과 앞에 언급된 3가지 경우 모두에 대해서 새로 제안된 토압산정식의 결과가 백규호의 제안식이나 Rankine의 토압이론에 의한 결과와 정확하게 일치하는 것으로 나타났다.

한편, 새로 제안된 토압산정식에 대하여 매개변수 분석을 수행하였다. 그 결과 사석과 모래의 내부마찰각이 커질수록 케이슨에 작용하는 주동토압은 감소하였으며, 사석의 뒷채움 경사각이 40° 이상인 경우에는 사석과 모래의 내부마찰각 변화가 주동토압에 미치는 영향이 매우 작은 것으로 나타났다. 그리고 사석의 뒷채움 경사각과 무관하게 케이슨의 벽면마찰각이 $\delta_r = 0.7\phi_r$ 일 때 주동토압과 모멘트 모두가 최소치에 근접하였으며, 케이슨의 벽면마찰각이 작을수록 주동토압의 작용점 높이가 낮아지는 경향을 보였다. 또한 $\beta > 10^\circ$ 의 경우 사석의 뒷채움 경사각이 커질수록 케이슨에 작용하는 주동토압의 작용점 높이는 낮아졌다. 이러한 매개변수 분

석의 결과에 근거할 때 사석과 모래의 내부마찰각은 극대화하고 단위중량은 최소로 하며, 사석의 뒷채움 경사각을 $28^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 의 범위로 하면서 케이슨의 벽면마찰각을 $\delta_r = 0.7\phi_r$ 로 할 때 케이슨에 작용하는 주동토압과 모멘트가 최소가 되는 것으로 나타났다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 백규호 (2003a), “평행이동하는 강성옹벽에 작용하는 비선형 주동토압 : I. 정식화”, *한국지반공학회 논문집*, 제19권 제1호, pp.181-189.
2. 백규호 (2003b), “평행이동하는 강성옹벽에 작용하는 비선형 주동토압 : II. 적용성”, *한국지반공학회 논문집*, 제19권 제1호, pp.191-199.
3. 백규호 (2006), “사석과 모래로 뒷채움된 케이슨에 작용하는 주동토압 (I) : 정식화”, *한국지반공학회 논문집*, 제22권 제1호, pp.63-72.
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. Tomlinson, M. J. (1987), *Pile Design and Construction Practice*, 3rd Ed., A Viewpoint Publication, pp.371.
7. 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. 17)

2003년도 논문 바로잡음

한국지반공학회논문집 제19권 1호의 191~199쪽에 게재된 논문 “평행이동하는 강성옹벽에 작용하는 비선형 주동토압: II. 적용성”에서 식 (4)를 다음과 같이 바로잡습니다.

$$\sigma_{ah} = \gamma z K_A \cos \delta = \gamma z \frac{\cos^2 \phi}{1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin \phi}{\cos \delta}}} \quad (4)$$

또한 매개변수분석과 관련한 내용중 그림 3과 4에 오류가 있어 해당 그림과 관련 내용을 다음과 같이 바로잡습니다.

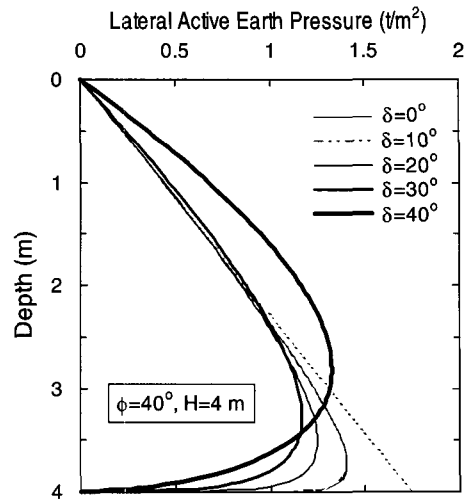
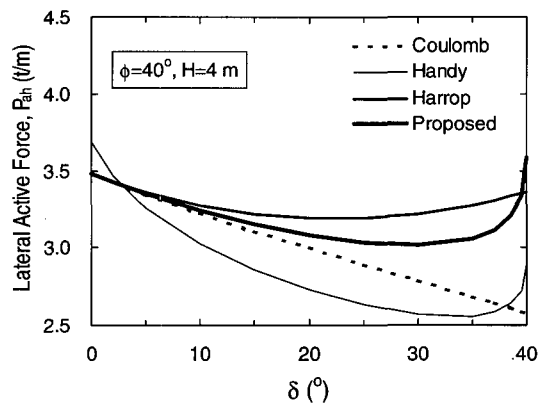
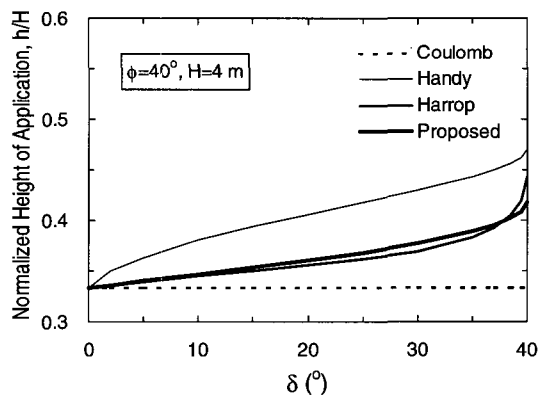


그림 3. 옹벽의 벽면마찰각에 따른 주동토압 분포의 변화



(a) 주동토압의 크기



(b) 옹벽 높이에 의해 기준화된 토압의 작용점 높이

그림 4. 옹벽의 벽면마찰각이 주동토압에 미치는 영향

그림 4(a)에 보이는 바와 같이 $\delta/\phi \leq 0.06$ 인 경우에는 그림에 비교된 4개의 토압산정식 중 Handy(1985)의 제안식이 가장 큰 주동토압을 산정하였으며, 본 연구에서 제안된 토압산정식과 Coulomb 이론 그리고 Harrop-Williams(1989)의 제안식은 비슷한 크기의 토압을 제공하였다. 그리

고 $0.06 \leq \delta/\phi \leq 0.94$ 인 경우 새로 제안된 토압산정식은 Handy의 제안식보다는 크고 Harrop-Williams의 제안식보다는 작은 토압을 산정하였으며, $\delta/\phi \geq 0.94$ 에서는 새로운 토압산정식이 가장 큰 토압을 산정하였다. 또한 새로 제안된 토압산정식은 Handy의 제안식과 Harrop-Williams의 제안식과 비슷하게 δ 가 증가함에 따라 주동토압이 감소하였으나 δ 가 0.75ϕ 를 넘어서면서부터는 토압이 다시 증가하는 경향을 보였다.

한편, 강성 옹벽에 작용하는 주동토압의 작용점 높이는 그림 4(b)와 같이 δ 가 증가함에 따라 높아지는 경향을 보

였다. 그리고 δ 의 모든 영역에서 Handy(1985)의 제안식이 가장 높은 작용점을 산정하였으며, $\delta/\phi \leq 0.92$ 에서는 새로운 제안식이 그리고 $\delta/\phi \geq 0.92$ 에서는 Harrop-Williams의 제안식이 Handy의 제안식 다음으로 큰 작용점 높이를 제공하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 제안식을 이용해서 계산되는 주동토압의 작용점 높이는 δ 에 따라 옹벽 높이의 1/3에서 0.42배까지 변하였다. 이것은 Coulomb 이론에 의해 계산된 토압의 작용점 높이인 옹벽 높이의 1/3보다 최대 25%까지 큰 값이다.