

수직판앵커의 하중-변위에 관한 실험적 연구

An Experimental Study On Load-Displacement Relationship Of Vertical Plate Anchor

이상돈*, Sang-Don Lee, 이영생**, Young-Saeng Lee, 이상덕***, Sang-Duk Lee, 권오균****, Oh-Kyun Kwon

- * 경기 대학교 토목공학과 석사 과정, Graduate Student, Dept. Of Civil Engineering, Kyong Gi University
- ** 경기 대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. Of Civil Engineering, Kyong Gi University
- *** 아주 대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. Of Civil Engineering, A Ju University
- **** 계명 대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. Of Civil Engineering, Gae Myung University

SYNOPSIS : A study on load-displacement relationship of vertical plate anchor was carried out using carbon rod model tests. Model tests were conducted at embedment ratios H/h from 1 to 17. Each test was repeated three times and the ultimate load and displacement were determined from average of the three tests. The failure mechanism around anchors were compared with the existing theories.

The ultimate anchor resistance has been expressed in terms of a non-dimensional breakout factor, $N_b = \frac{P_u}{\gamma H A}$. For shallow anchors, the breakout factor N_b increases with embedment ratio (H/h) up to a maximum value. The value of N_b remains approximately constant when $H/h \geq (H/h)_c$. The critical embedment ratio is about 8 for dense state. For shallow anchors, a non-dimensional load-displacement relationship can be approximated by a hyperbola and compared with existing theories. (Das & Seeley's Equation). In the case of deep anchors, a non-dimensional load-displacement relationship can be approximated by a hyperbola and new hyperbola constants were proposed.

1.서론

일반적으로 앵커는 지반 구조물에서 구조물 자체로서는 충분한 안정성을 확보하기 곤란한 경우에 그 안정성을 향상시키기 위하여 지반 내에 설치하는 인장구조체를 말한다. 이러한 인장구조체는 지반 구조물에 작용하는 외력을 토체 또는 암반에 전달하는 역할을 수행하여 구조물의 안정성을 확보하게 된다. 앵커의 용도는 토류구조물, 즉 옹벽 및 널말뚝등의 활동 방지, 사면과 터널의 안정성, 산사태 방지, 그리고 보강토 구조물의 보강재 등의 여러 가지 목적으로 최근 우리 나라에서도 널리 사용되고 있는 실정이다. 지반 내에 설치되는 앵커는 그 모양과 용도에 따라 판 앵커, 나선형 앵커, 말뚝 앵커 등으로 분류하고 있다.

본 연구에서는 이들 여러 종류의 앵커 중에서 토류구조물 특히 옹벽이나 널말뚝등에 널리 사용되고 있는 수평력을 받는 수직판 앵커의 하중-변위관계에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. 사질 지반에 묻힌 수직판앵커의 극한 저항에 관한 연구는 Rankine의 수평 토압이론을 이용한 Terzaghi의 연구로부터 현재까지 많은 진전이 있었고, 다양한 파괴 메카니즘에 따른 극한 저항력 공식이 발표되었지만 하중-변위 관계에 관한 연구는 Das & Seeley의 연구(1975)를 제외하고는 국내외적으로 미미한 편이다. 따라서 본 연구에서는 탄소봉을 이용한 평면 변형률 상태의 모형 지반에서 앵커 주변 지반의 파괴 메카니즘을 기존의 방법들과 비교, 검토하고 앵커의 수평변위에 따른 저항력의 변화를 연구하고자 한다. 또한 얇은 앵커와 깊은 앵커를 구분하는데 기준이 되는 한계 근입깊이비와 앵커 판의 앞면과 뒷면에 발생하는 수평 변위에 따른 수동토압과 주동토압의 관계를 규명하고 아울러 실험 결과로부터 얻은 하중-변위 관계를 쌍곡선 함수로 근사화 시켜 근입 깊이의 비가 1부터 5까지의 비교적 얇은 근입깊이에서 쌍곡선 함수를 이용한 기존의 방법(Das & Seeley's Equation)과 비교하고 지금까지 거의 연구되지 않은 비교적 깊은 근입깊이에서의 하중-변위관계식을 쌍곡선 함수로 근사화 시켜 제안하고자 한다.

2.실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서 수행한 모형실험 장치는 □자 형상을 사용한 100cm×100cm×10cm크기의 모형 틀을 이용하였으며 직경이 4mm, 6mm, 8mm인 탄소봉(그림1)을 이용하여 일정한 비율의 평면 변형률 상태로 모형 지반을 조성하였다. 조성된 모형 지반의 내부마찰각은 31° 이고 단위중량은 1.4 t/m³, 점착력은 0이다. 모형 앵커 판은 높이가 5cm, 두께 0.5cm인 가볍고 강성이 큰 알루미늄 합금의 일종인 듀랄루민(duralumin)을 사용하여 그림2와 같이 2개의 앵커 판을 제작하였다. 그리고 앵커 판에 하중을 재하하기 위한 장치로는 그림3과 같이 모터와 기어박스를 이용하였으며 수동토압과 주동토압, 수평 변위를 측정하기 위하여 하중계(load cell) 2개, 변위계(LVDT) 1개를 설치하여 personal computer에 연결하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 모형 앵커 판의 저항력과 변위를 측정하기위해 설치한 하중계(load cell)와 변위계(LVDT)를 각각의 Data Logger에 연결하여 10초간격

으로 저항력과 변위를 측정하였으며 모형 앵커 판의 하중 재하장치인 기어박스를 이용하여 수평 방향으로 재하속도를 1.0 mm/min으로 재하 하였고 앵커의 변위는 수평방향으로만 허용하였다. 앵커판에 발생하는 마찰력을 최소화 시키기 위해 모형앵커판의 둘레에 투명 테이프를 부착한 후 윤활유(WD40)를 발라주었다. 앵커판 뒷면에 발생하는 주동토압을 보다 정확히 측정하기 위해 그림2와 같은 모양으로 주동측 앵커판의 뒷면과 바닥면을 약간 이격시켰다.

그리고 수직판 앵커의 거동을 파악하기 위하여 모형 앵커판의 높이와 근입깊이의 비인 근입깊이비(H/h)를 1부터 17까지 변화시켜 3회반복 수행하였으며, 특히 파괴메카니즘의 모양을 시각적으로 정확히 관찰하기위한 목적으로 모형지반에 격자모양의 줄을 그어 각 근입 깊이에서 관찰된 지반변형 모양을 실험전, 실험후 그리고 실험진행과정을 사진으로 촬영하였다.

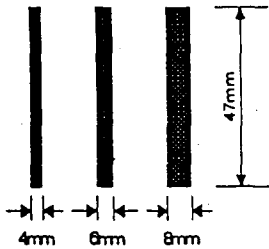
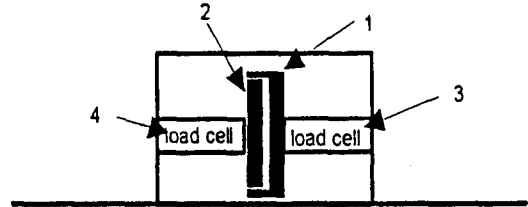
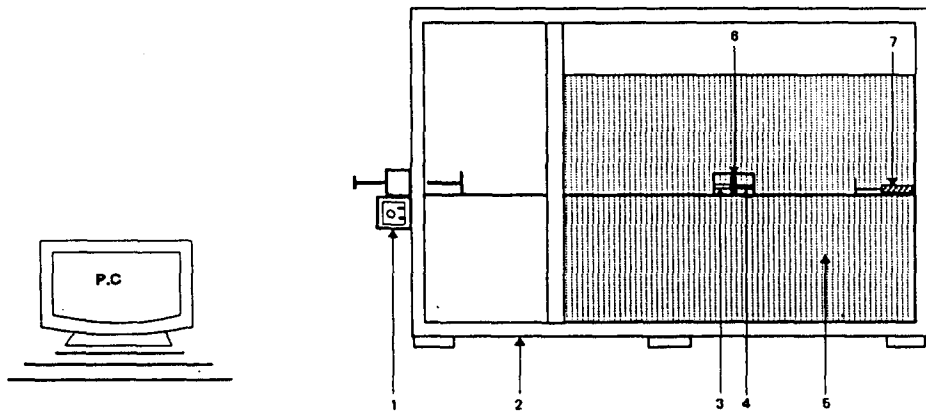


그림1. 모형실험에 사용된 탄소봉(carbon rod)



1.수동측 앵커판 2.주동측 앵커판 3.수동토압 측정용 하중계 4.주동토압 측정용 하중계

그림2. 모형실험에 사용된 모형 앵커판



1.재하장치(기어박스) 2.모형틀 3.하중계(주동토압측정용) 4.하중계(수동토압측정용) 5.모형지반(탄소봉) 6.모형앵커판 7.변위계(LVDT)

그림3.모형실험장치

3.수직판앵커(vertial plate anchor)의 거동에 관한 이론적 고찰

구조물과 지반을 연결하기 위해 설치하는 수직판 앵커의 기하학적 형태는 그림4와 같다. 여기서, 앵커 판의 높이와 폭은 h와 B이고 지표면으로부터 앵커판 바닥까지의 거리인 근입 깊이는 H이다. 대부분의 실제적인 경우에 있어 폭과 앵커판의 높이와의 비(B/h)가 5이상이라면 앵커는 띠 앵커(2차원 평면변형상태)로서 간주할 수 있으며 근입깊이에 따라 얇은 앵커(shallow anchor)와 깊은 앵커(deep anchor)로 분류할 수 있다. 극한 하중에서 앵커 주변 흙의 파괴면이 지표면까지 확장되는 전반전단파괴를 일으키는 앵커를 얇은 앵커라 하고 파괴면이 지표면까지 확장되지 않고 국부적으로 발생될 때 이러한 앵커를 깊은 앵커라 한다.

그리고 극한 하중(P_u)을 앵커 하단에서의 연직응력($=\gamma \times H$)과 앵커의 면적($A=B \times h$)으로 나누면 무차원 항인 파괴계수(breakout factor)를 얻을 수 있고 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$N_o = \frac{P_u}{\gamma H A} \quad (1)$$

파괴계수(N_q)는 얇은 앵커에 대해서 그림5와 같이 근입깊이비(H/h)가 증가함에 따라 최대 값까지 증가한다. 파괴계수(N_q)값이 최대치에 도달할때의 근입깊이비(H/h)를 한계 근입깊이비 $(H/h)_c$ 라 정의할 수 있으며 근입깊이비(H/h)가 $(H/h)_c$ 보다 작을 경우 얇은 앵커라 하고 $H/h > (H/h)_c$ 일 경우 파괴계수 값이 일정하게 유지되며 N_q 를 N_q^* 로 표시한다. 이를 깊은 앵커라 한다.

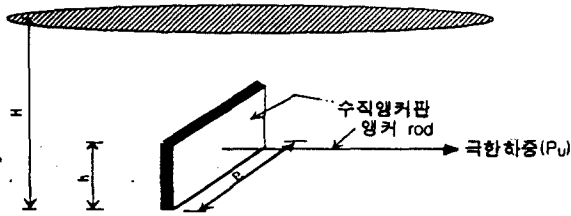


그림4. 수직판앵커(vertical plate anchor)의 기하학적 형태

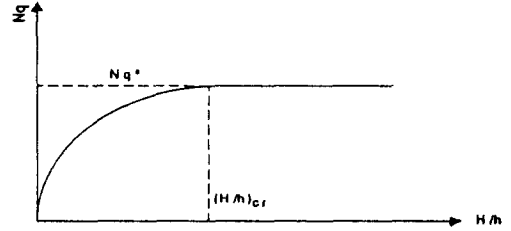


그림 5. 근입깊이비(H/h)에 따른 파괴계수(N_q)의 변화

3.1 얇은 앵커(shallow anchor)

3.1.1 Terzaghi에 의한 해석

Terzaghi는 수평력을 받는 수직판 앵커에 대해 그림6.에서와 같이 앞면에는 Rankine의 수동토압이 뒷면에는 주동토압이 작용하는 것으로 보았다.

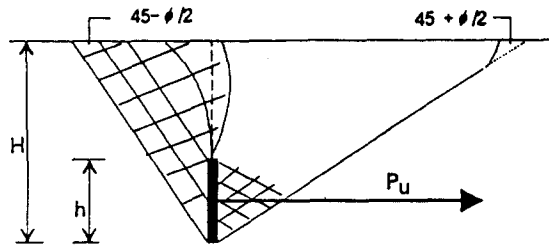


그림 6. Terzaghi에 의해 가정된 얇은 앵커 주변의 파괴형태

얇은 앵커의 극한하중은 식(2)과 같다.

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma B H^2 \left[\tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) - \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) \right] \quad (2)$$

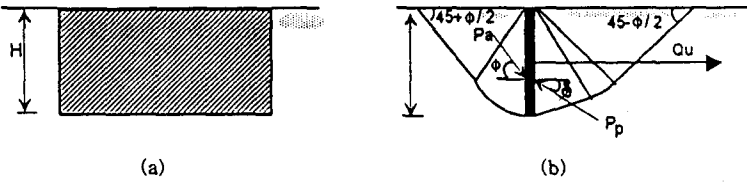
여기서, H 는 근입깊이, B 는 수직판앵커의 폭, P_u 는 극한하중, γ 는 흙의 단위중량, ϕ 는 흙의 내부마찰각 이다. Terzaghi의 연구는 원리가 비교적 간단하여 얇은 조건하에 있는 수직판 앵커의 극한하중을 대략적으로 계산할수 있다는 장점이 있다.

3.1.2 Ovesen과 Stromann에 의한 해석

1964년, Ovesen은 사질토에서 얇은 앵커에 대해 수행한 모형실험의 결과를 발표 하였으며 이 모형실험에 기초하여 Ovesen과 Stromann(1972)은 basic case, strip case, actual case라는 세가지 해석 방법을 제안 하였다. basic case는 그림7.과 같이 높이 H 에 대한 연속 앵커판의 단위폭당 저항력을 결정한다. 단위폭당 극한저항력(Q_u)의 크기는 식(3)과 같다.

$$Q_u = \frac{1}{2} \gamma H^2 k_s \cos \delta - P_o \cos \phi = \frac{1}{2} \gamma H^2 k_s \cos \delta - \frac{1}{2} \gamma H^2 k_o \cos \phi = \frac{1}{2} \gamma H^2 (k_s \cos \delta - k_o \cos \phi) \quad (3)$$

여기서, k_a 는 주동토압계수이고 k_p 는 수동토압계수이다.



P_p :앵커의 단위폭당 수동토압 P_a :앵커의 단위폭당 주동토압 ϕ :흙의 내부마찰각
 δ : 벽 마찰각 Q_u :앵커의 단위폭당 극한 저항력 W :앵커판의 단위폭당 무게

그림 7. basic case

strip case는 그림8.과 같이 높이가 h이고 근입깊이 H인 띠앵커의 단위폭당 저항력을 결정한다.

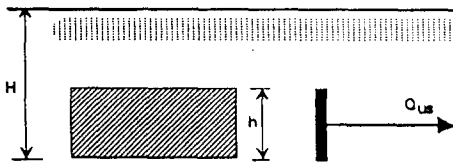


그림 8. strip case

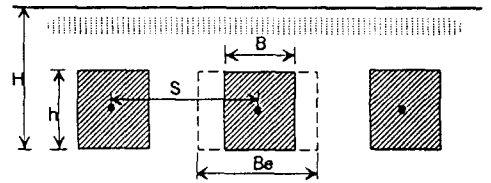


그림 9. actual case

단위폭당 극한 저항력의 크기는 식(4)와 같다.

$$Q_{us} = \left[\frac{C_{av} + 1}{C_{av} + \left(\frac{H}{h}\right)} \right] Q_u = R_{ou} Q_u \quad (4)$$

여기서, Q_u 는 식(3)이고 C_{av} 는 조밀한 모래에서 19, 느슨한 모래에서 14이다. actual case는 그림9.와 같이 각 앵커의 중심 사이의 간격이 S인 행으로 배치되며 B/h에 따른 각 앵커의 극한 저항력을 결정한다. 극한저항력(P_u)의 크기는 식(5)와 같다.

$$P_u = Q_{us} B_e \quad (5)$$

여기서, B_e 는 동가폭(equivalent width)으로 앵커의 폭(B)보다 크다. (B_e 는 S,B,H,h의 함수)

3.1.3 Biarez, Boucraut, Neger에 의한 해석

Biarez, Boucraut, Neger(1965)는 극한 해석을 이용하여 수직 띠앵커판의 극한 하중을 구하기 위한 계산 방법을 제안했다. 얇은 앵커의 저항력은 앵커판의 표면 거칠기와 자중에 의해 좌우되며 Dickin 과 Leung(1985)는 Biarez(1965)의 표현을 식(6)과 같이 간단한 형태로 표현 하였다.

$$Q_{us} = \gamma h^2 M_{r0} \quad (6)$$

$$M_{r0} = (k_p - k_a) \left(\frac{H}{h} - \frac{1}{2} \right) + k_p \frac{\sin 2\phi}{2 \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)} \left(\frac{H}{h} - 1 \right)^2 \quad (7)$$

여기서, Q_{us} 는 띠앵커의 단위 길이당 극한 하중이고, M_{r0} 는 force coefficient로 $Q_{us}/\gamma h^2$ 이다. 그리고 Birez(1965)는 또한 얇은 정방형 앵커의 극한하중을 구하는 방법을 식(8)과 같이 제안 하였다.

$$P_u = \gamma B h^2 M_{r0(\phi)} \quad (8)$$

$$M_{r(\phi)} = M_r + \phi \frac{h}{B} (\sqrt{k_p} - \sqrt{k_c}) \left(\frac{H}{h} - \frac{2}{3} \right) + \frac{1}{2} (1 + \phi) \frac{h}{B} k_p \sin 2\phi \left(\frac{H}{h} - 1 \right) \quad (9)$$

여기서, P_u 는 정방향 앵커의 극한 저항력이고, $M_{r(\phi)}$ 는 정방향 앵커의 force coefficient로 $P_u / \gamma B h^2$ 이다.

3.2 깊은앵커(deep anchor)

3.2.1 Ovesen의 방법

Ovesen은 깊은 조건하에 있는 띠형 판앵커(strip plate anchor)의 거동을 기초의 지지력(bearing capacity)의 거동과 유사하다고 보고 사질 지반에 근입된 수직판 앵커의 극한하중과 파괴계수를 다음과 같이 유도 하였다.

$$P_u = \gamma H A (1.6 + 4.1 \tan^4 \phi) (1 - \sin \phi) e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (10)$$

$$N_q^* = \frac{P_u}{\gamma B h H} = (1.6 + 4.1 \tan^4 \phi) (1 - \sin \phi) e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (11)$$

여기서, P_u 는 극한하중, A는 앵커의 면적(=B×h), H는 근입깊이, γ 는 흙의 단위중량, ϕ 는 흙의내부 마찰각이다.

3.2.2 Biarez에 의한 해석

Biarez는 그림10.에서와 같이 깊은 띠앵커(H/h>7)의 주변에서 앵커의 전방에 발생하는 원통형 토체의 회전에 필요한 우력을 고려하므로서 회전체로 해석 하였다.

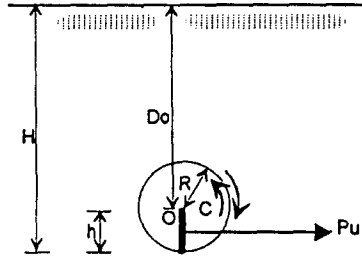


그림 10. 깊은 앵커 주변의 파괴형태

그림10에서 원 둘레의 수직 응력성분은 γD_0 로 균등하다는 가정하에 원형 파괴면내에 작용하는 단위길이당 우력은 다음식(12)와 같다.

$$C = 2 \pi R \gamma D_0 \tan \phi \quad (12)$$

원의 반경 R과 앵커판 높이 h가 같다고 보고 원점 O에서 모멘트 평형식을 세우면 식(13)과 같고 극한 저항력은 식(14)와 같다.

$$\frac{P_u}{B} \frac{h}{2} = 2 \pi \gamma h^2 D_0 \tan \phi \quad (13)$$

$$P_u = 4 \pi \gamma h B D_0 \tan \phi \quad (14)$$

식(14)를 깊은 앵커의 파괴계수(N_q^*)의 식으로 표현하면 식(15)와 같다.

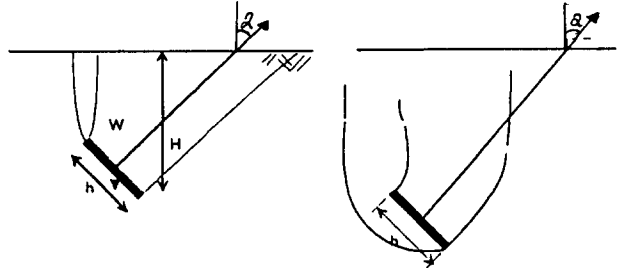
$$N_q^* = \frac{P_u}{\gamma B h H} = \left(1 - \frac{h}{H} \right) 4 \pi \tan \phi \quad (15)$$

3.2.3 Meyerhof에 의한 해석

Meyerhof는 α 의 각만큼 기울어진 경사앵커가 극한 하중을 받을때 파괴모양을 다음 그림11.과 같이 보았다. 수동토압과 주동토압의 차이가 앵커의 주변장위에 놓인 수직면에서의 전단 저항을 유발하게 되며 이때의 저항은 극한 저항과 같아지게 되며 얇은 조건의 경우와 깊은조건의 경우로 분류하였다. 얇은 조건의 경우, 경사앵커의 극한 하중은 식(16)과 같다.

$$P_u = (ck_c \frac{H}{h} + \frac{1}{2} \gamma H^2 k_b \frac{1}{h}) A + W \cos \alpha \quad (16)$$

- 여기서, A: 앵커판의 면적(=B×h)
- c: 흙의 점착력
- H: 근입깊이
- k_b, k_c : 인발계수
- P_u : 극한하중
- W: 앵커무게 + 앵커위에 수직으로 놓인 흙의무게
- α : 수직면에대한 극한 하중의 경사각
- γ : 흙의 단위중량
- ϕ : 흙의 내부마찰각



(a)얇은앵커 (b)깊은앵커

그림 11. Meyerhof에 의해 가정된 앵커판 주변의 파괴형태

따라서 사질지반에 묻힌 띠형 수직판앵커($c=0, \alpha=90^\circ$)의 극한 하중과 파괴계수는 다음과 같다.

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma H^2 k_b \frac{1}{h} A \quad (17)$$

$$N_u = P_u \gamma H A = \frac{1}{2} (\frac{H}{h}) k_b \quad (18)$$

여기서, 인발계수 k_b 는 Rankine의 주동토압계수와 수동토압계수의 차이이다. ($k_b = k_s - k_a, k_a = \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}), k_s = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$) 깊은 조건의 경우, 식(17)에 H/h 대신 $(\frac{H}{h})_{cr}$ 을 대입하면 깊은 앵커의 극한 하중과 파괴계수를 다음과 같이 구할수 있다.

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma H k_b (\frac{H}{h})_{cr} A \quad (19)$$

$$N_u = \frac{P_u}{\gamma H A} = \frac{1}{2} (\frac{H}{h})_{cr} k_b \quad (20)$$

3.3 앵커에 작용하는 하중-변위 관계.

1975년 Das & Seeley는 앵커에 작용하는 하중-변위 관계를 쌍곡선으로 근사화 시켜 표현하였다. Das & Seeley에 의해 표현된 쌍곡선 함수는 식(21)과 같다.

$$\bar{P} = \frac{\bar{\Delta}}{a + b\bar{\Delta}} \quad (21)$$

$$\frac{\bar{\Delta}}{\bar{P}} = a + b\bar{\Delta} \quad (22)$$

여기서, $\bar{P} = \frac{P}{P_u}$ ($P \leq P_u$), 즉 P는 최대 저항력보다 작은 임의의 저항력에서 ($P \leq P_u$)의 하중이고, $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{\Delta_u}$ ($\Delta \leq \Delta_u$)이다. a,b는 실험에 의해서 결정할

수 있는 상수이다. 그림12.에서 보듯이 상수 a 는 초기점선계수 $(\frac{\bar{\Delta}}{\bar{P}})_0$ 의 역수이고 b 는 $\bar{\Delta}$ 가 무한대일 경우 $\bar{P}-\bar{\Delta}$ 곡선이 접근하게 될 점선 값의 역수이지만 이 문제의 경우 \bar{P} , $\bar{\Delta}$ 의 최대값이 1이므로 $b=1$ 일 경우에만 $\bar{P}-\bar{\Delta}$ 곡선이 점선에 접근하게 된다. 식(21)을 식(22)과 같이 변형해서 그림13.에서와 같이 직선의 형태로 나타낸다면 a, b 의 값은 쉽게 결정할 수 있다. 실험으로부터 그림14.와 같은 결과를 구한다면 이 그림에서 Δ_u 를 구하고, 또한 앞에서 서술된 이론들을 이용하여 극한하중 P_u 를 구한다면 임의의 변위 Δ 에서의 저항력 P 는 식(21)로부터 계산할 수 있다. 그러나 Δ_u 의 값이 실험 값이고 다소 변하기 때문에 여기서 구한 P 의 값은 단지 근사값밖에 될 수 없다.

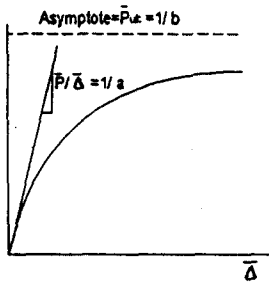


그림12.쌍곡선 $\bar{P}-\bar{\Delta}$ 곡선

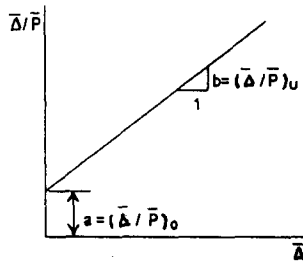


그림13. 변형된 $\frac{\bar{\Delta}}{\bar{P}}-\bar{\Delta}$ 곡선

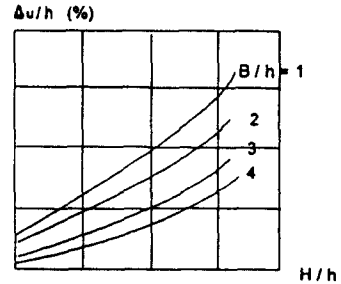


그림14. B/h 의 변화에 따른 $\frac{\Delta_u}{h}-\frac{H}{h}$ 곡선

4. 실험결과 및 분석

4.1 수직판앵커의 파괴형태에 따른 극한저항력 ($1 \leq \frac{H}{h} \leq 17$)

수직판앵커의 근입깊이에 따른 파괴모양이 그림15.와 그림16.에 나타나있다. 이 그림으로부터 근입깊이비가 1과 2정도의 작은 경우의 파괴메카니즘은 Rankine의 토압이론을 적용한 Terzaghi의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 근입깊이비(H/h)가 증가할수록 파괴메카니즘은 직선이 아닌 곡선의 형태로 나타나고 있으며 H/h 가 8정도가 되면 파괴메카니즘은 지표면 까지 진행되지 않고 지반속에서 국부적으로 발생함을 알 수 있다. 그림17.에는 모형실험으로부터 구한 파괴계수(breakout factor)와 H/h 의 관계를 나타내었다. 따라서 본 모형실험의 결과와 그림17.의 결과로부터 얇은 앵커와 깊은 앵커의 분류 기준이 되는 한계근입깊이비($(\frac{H}{h})_c$)는 8정도임을 알 수 있다.

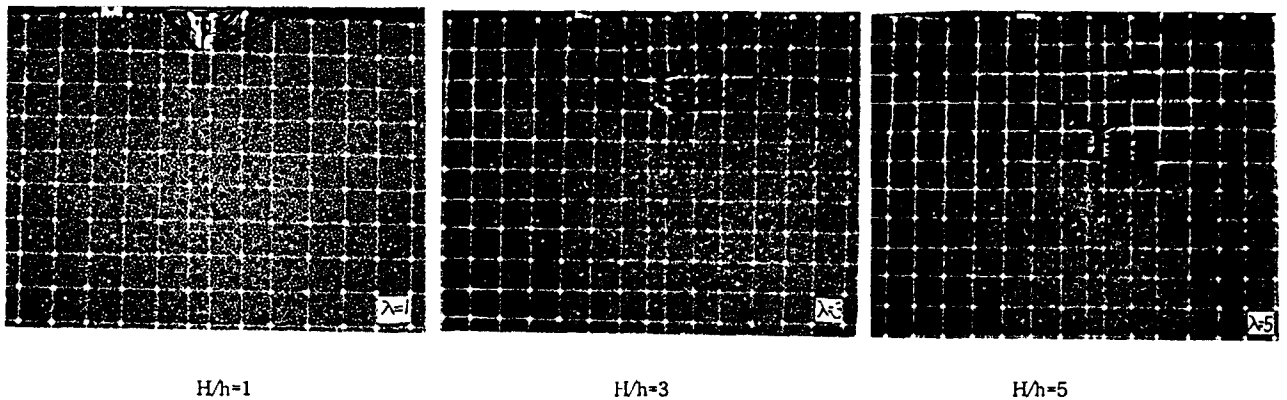


그림15. 근입깊이비의 변화에 따른 파괴메카니즘(얇은앵커)

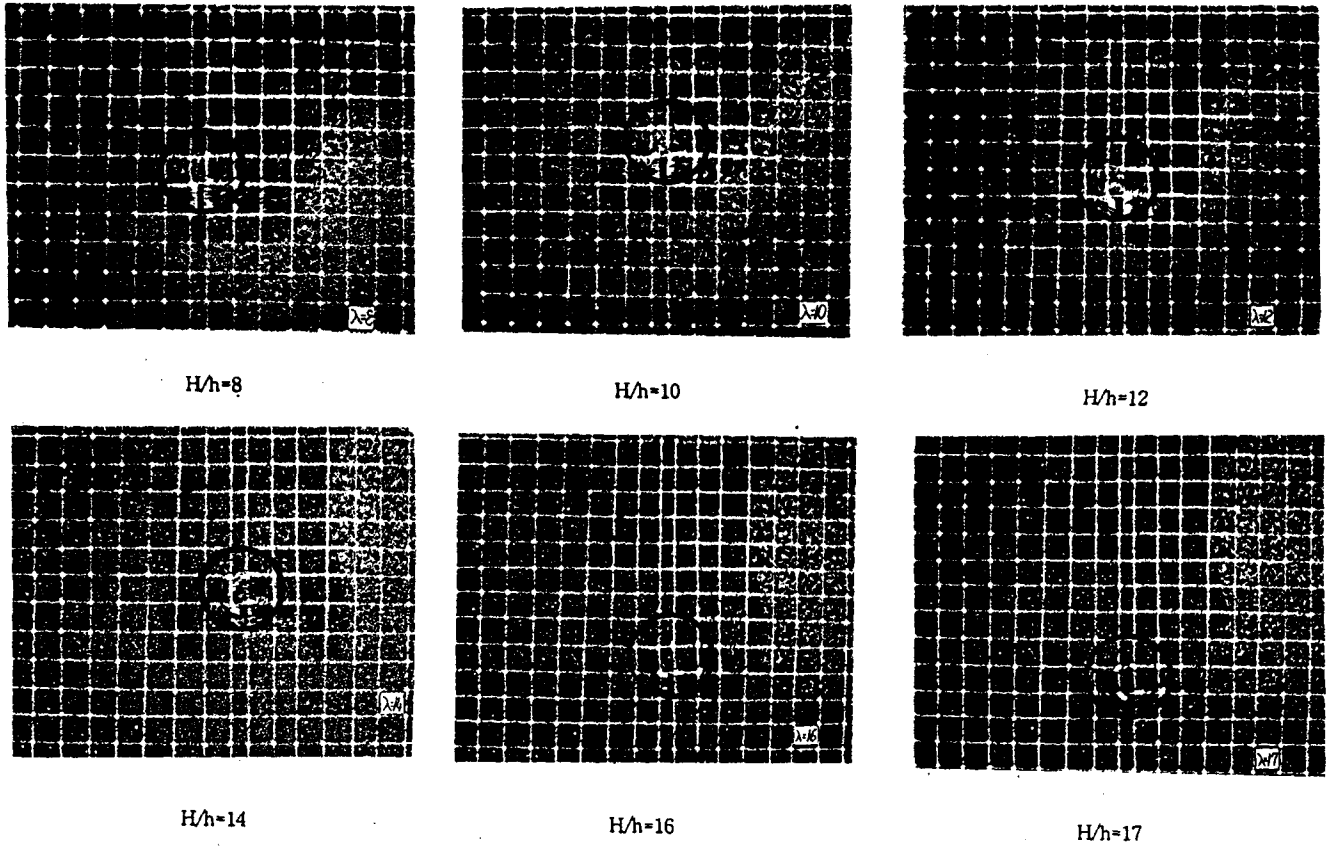


그림 16. 근입깊이비의 변화에 따른 파괴메카니즘(깊은앵커)

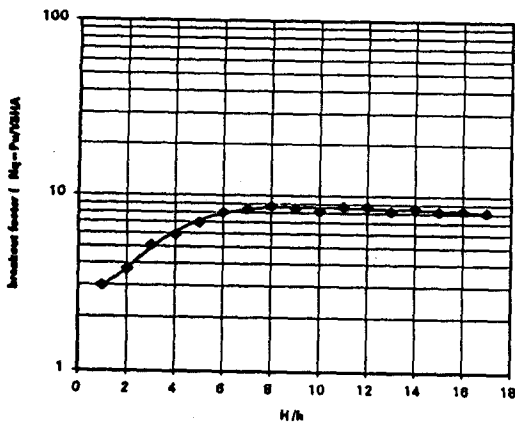


그림 17. 근입깊이비의 변화에 따른 파괴계수의 변화

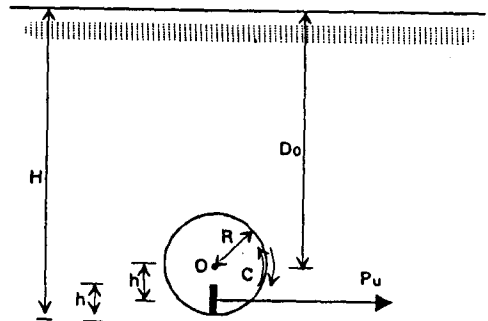


그림 18. 깊은 앵커 주변의 파괴형태

그리고 그림 16.에서와 같이 깊은 앵커 즉, $8 \leq H/h \leq 17$ 에서 파괴메카니즘은 R을 반지름으로 하는 원형 파괴형태를 이루고 있으며 이러한 파괴형태는 Biarez의 연구 결과와 잘 일치하고 있다. 그러나 Biarez는 단지 앵커의 높이(h)와 파괴원의 반경(R)이 같다고 보아 간편식을 제안 했지만 실제 파괴형태를 그림 16.에서 보면 $R=1.5h$ 정도임을 알 수 있다. Biarez가 제안한 간편식으로 구한 극한 저항력은 기존의 다른 방법들과 모형실험으로부터 구한 극한 저항력보다 작게 산출됨을 알 수 있다. 따라서, 깊은 앵커에 대해 다소 과소평가되고 있는 Biarez의 간편식을 수정하고자 한다.

그림 16의 파괴형태를 분석해 보면 그림 18.같이 나타낼 수 있다. 그림 18.에서 원뿔체의 수직응력 성분을 γD_0 로 균등하다고 보고 $R=1.5h$ 로 보면 원형 파괴

면 내에 작용하는 단위 길이당 우력은 다음식과 같다. (식(12))

$$C = 2\pi R\gamma D_0 \tan \phi \quad (12)$$

따라서, 원점O에서 모멘트 평형식을 세우면 식(23)과 같고 극한저항력은 식(24)와 같다.

$$\frac{P_u}{B} h = 2\pi\gamma R^2 D_0 \tan \phi = 2\pi\gamma (1.5h)^2 D_0 \tan \phi \quad (23)$$

$$P_u = 4.5\pi\gamma h B D_0 \tan \phi \quad (24)$$

식(24)에서 구한 극한 하중, 모형실험을 통해 실측된 극한 하중과 Biarez의 간편식으로 구한 극한 하중, 그리고 다른 기존의 방법들로 구한 극한하중을 비교하면 그림19.와 같다. 이 그림에서 보듯이 얇은 앵커에 있어서는 Ovesen의 방법을 제외한 다른 방법들은 모두 비슷한 결과를 나타내고 깊은 앵커에서 Biarez의 방법은 다소 과소 평가됨을 알수 있다.

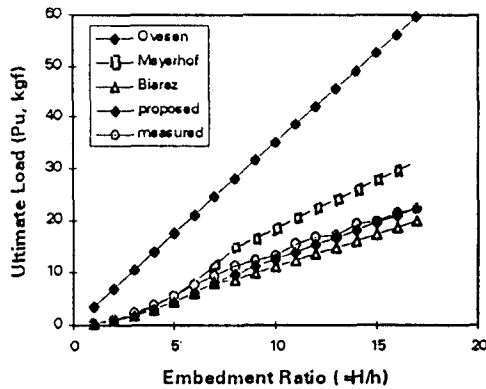
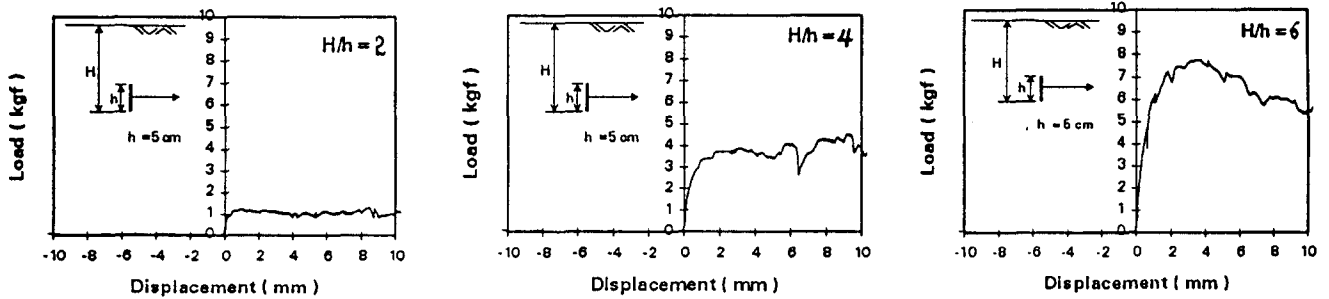
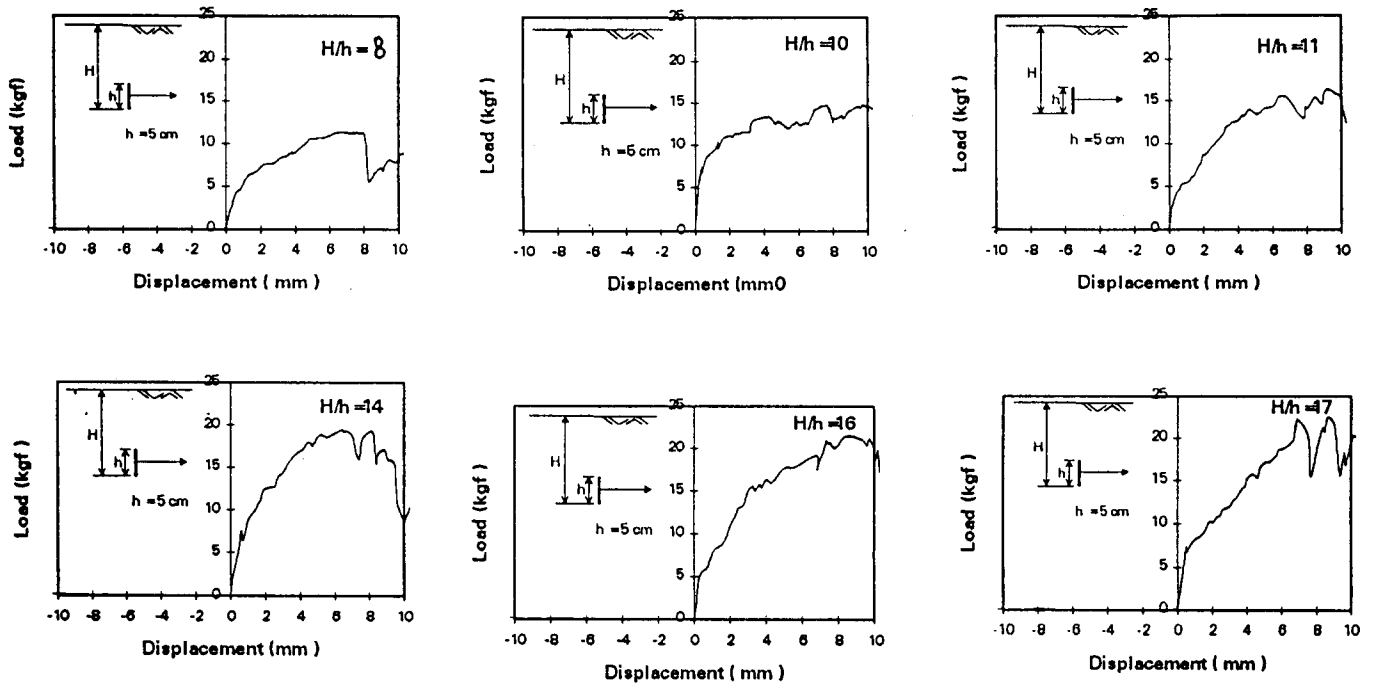


그림19. 근입깊이비에 따른 극한저항력의 비교

그림20.은 근입 깊이비에 따른 수직판앵커의 앞면과 뒷면에 작용하는 힘들의 분포를 나타내고 있다. 초기 상태에서는 앵커판의 앞면과 뒷면에 정지토압이 작용하는 상태이다. 이그림에서 알수 있는 바와 같이 수동토압이 증가함에 따라 주동토압이 감소함을 알수 있으며 수동측의 최대치에 도달하기전에 주동측은 이미 최소치에 도달하고 있음을 알수있다.



(a) 얇은앵커(shallow anchor)



(b) 깊은앵커 (deep anchor)

그림20.근입깊이비(H/h)에 따른 하중-변위관계

4.2 하중-변위관계에 대한 해석

모형 앵커판의 근입 깊이비의 변화에 따른 극한 저항력 P_u 는 그림21.에서와 같다.

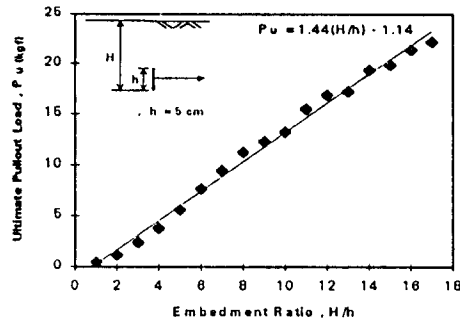


그림21. 앵커판의 극한저항력

하중(P)-변위(Δ) 관계로부터 구한 무차원 하중(\bar{P})-변위($\bar{\Delta}$)는 다음과 같이 일반화된 형태로 표현 할수 있다.

$$\bar{P} = \frac{P}{P_u} \quad \text{for } P \leq P_u \quad (25)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{\Delta_u} \quad \text{for } \Delta \leq \Delta_u \quad (26)$$

근입 깊이비(H/h)의 변화 즉, $1 \leq H/h \leq 5$, $1 \leq H/h \leq 7$, $8 \leq H/h \leq 17$ 에서 앵커판에 대한 $\bar{P} : \bar{\Delta}$ 의 표현과 쌍곡선으로 근사화된 $\bar{P} - \bar{\Delta}$ 관계 곡선은 그림22에서와 같으며 근사화된 쌍곡선의 표현은 다음과 같다. (a, b는 실험으로부터 구할수 있는 상수)

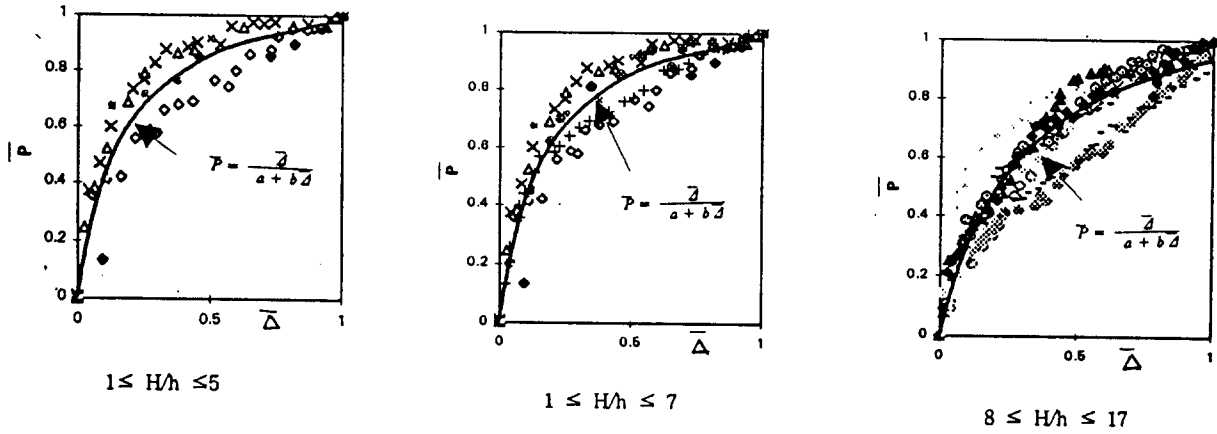


그림22. 앵커판에 대한 $\bar{P} - \bar{\Delta}$ 관계곡선

$$\bar{P} = \frac{\bar{\Delta}}{a + b\bar{\Delta}} \quad (27)$$

$$\frac{\bar{\Delta}}{\bar{P}} = a + b\bar{\Delta} \quad (28)$$

그림22.에서의 a,b값을 결정하기위해 나타낸 $\frac{\bar{\Delta}}{\bar{P}} - \bar{\Delta}$ 관계는 그림23.과 같다.

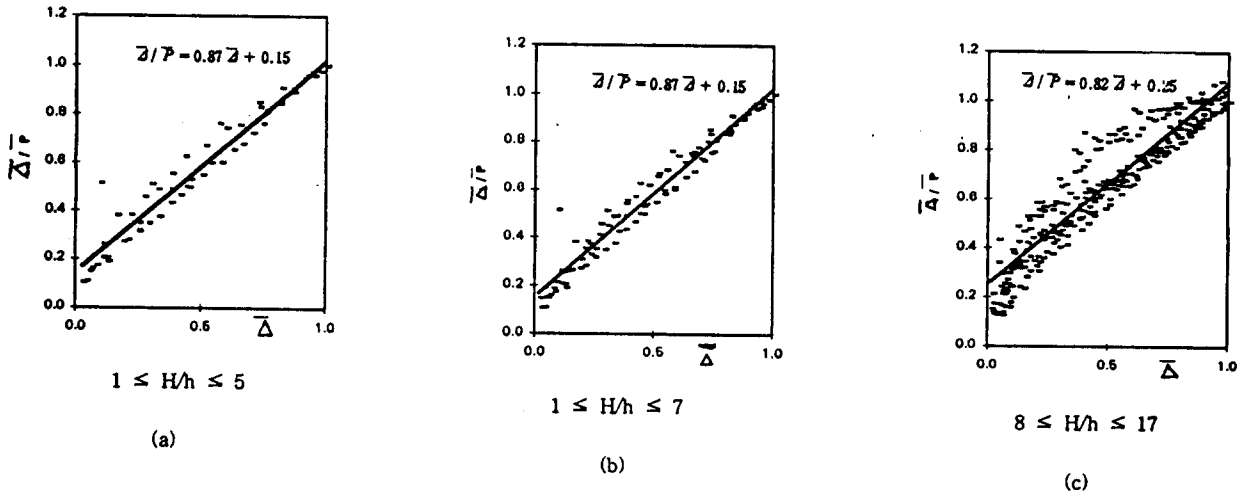


그림23. $\bar{\Delta} / \bar{P} - \bar{\Delta}$ 관계

그림23.에서 볼수있듯이 (a)에서의 실험치들을 1차직선으로 근사화 시키면 $a = 0.15$, $b = 0.87$ 로 Das & Seeley가 제안한 값들과 유사하며 또한 얇은 앵커(b)의 값도 $a = 0.15$, $b = 0.87$ 로 같게 나타난다. 그리고 지금까지 연구된적이 없는 깊은앵커(c)의 무차원 하중-변위관계의 상수값은 $a = 0.25$; $b = 0.82$ 로 근사화 됨을 알 수 있다. 따라서 깊은 앵커에 있어서의 무차원 하중-변위 관계식은 식(29)와 같이 표현할수 있다.

$$\bar{P} = \frac{\bar{\Delta}}{0.25 + 0.82\bar{\Delta}} \quad (29)$$

5. 결론

본 연구에서 나타난 결과를 종합하여 보면 다음과 같다.

(1) 근입깊이에 따른 수직 앵커판의 파괴메카니즘은 근입깊이비가 작은 경우에는 기존의 얇은 앵커에 대한 연구결과와 비슷하게 나타났다. 그리고 본 모형실험에서 나타난 한계 근입깊이비(H/h)는 약 8로 나타났다.

(2) 모형실험을 통해 관찰된 파괴메카니즘을 근거로 근입깊이비(H/h)가 대략 $8 \leq H/h \leq 17$ 에서 Biarez의 연구결과와 잘 일치 하지만 극한하중 산정을 위한 Biarez의 간편식은 과소평가되므로 Biarez의 연구결과를 수정하여 제안하였다.

(3) 수직판앵커의 앞면에는 수동토압이 뒷면에는 주동토압이 작용하며 수동측의 최대치에서 파괴가 된다고 가정했을 때, 주동측은 이미 최소치에 도달했음을 알수있다.

(4) 쌍곡선으로 근사화시킨 하중-변위관계는 비교적 얇은 근입 깊이에서는 Das & Seeley의 연구와 유사하게 나타난다. 그러나 깊은앵커 ($8 \leq H/h \leq 17$)의 하중-변위관계에 대한 기존의 연구결과는 거의 없었다. 따라서, 본 모형실험을 통해서 실측된 무차원 하중-변위 관계를 이용하여 깊은 앵커에서의 쌍곡선식을 제안 하였다.

(5) 수직판 앵커의 근입깊이비에 따른 파괴메카니즘과 하중-변위 관계를 알아보기 위해 본 모형실험을 수행하였으며 앵커판의 높이와 폭의 비의 변화에 따른 연구를 실제 사질지반을 이용한 모형 토조에서의 실험과 현장 시험도 실시하여야 한다.

참고문헌

1. 권오균, 이상덕, 이영생(1994), 수직앵커판의 거동에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.597~599.
2. 우상백(1994), 수직판 앵커의 극한 저항에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문.
3. Neely, W. J., Stuart, J. G. and Graham, J.(1973), Failure Load of Vertical Anchor Plates in Sand, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.99, pp.669~685.
4. Das, B. M. and Seeley, G. R.(1975), Load-Displacement Relationship for Vertical Anchor Plates., J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.101, No7, pp.711~715.
5. Das, B. M.(1975), Pullout Resistance of Vertical Anchors, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.101, pp. 87~91.
6. Das, B. M.(1987), Theoretical Foundation Engineering, Elsevier, No.47, pp.160~183.
7. Das, B. M.(1990), Earth Anchors, Elsevier, No.50
8. Dickin, E. and Leung, C. F.(1985), Evaluation of Design Methods for Vertical Anchor Plates, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.111, No.4, pp.500~520
9. Meyerhof, G. G.(1973), Uplift Resistance of Inclined Anchors and Piles, Proc. VIII Intl. Conf. Soil Mech. Found. Engrg, Moscow, USSR, 2.1, pp.167~172
10. Biarez, I., Boucraut, L. M., and Negre, R., Limiting Equilibrium of Vertical Barriers Subjected to Translation and Rotation Forces, Provc, VI Intl. Conf. Soil Mech. Found. Engrg., Montreal, Canada, 2, pp.368~372.
11. Akinmusuru, J. O.(1978), Horizontally Loaded Vertical Plate Anchors in Sand, J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol.104, No.2, pp.283~286
12. Chandrakant S. E. and Hema J. S.(1984), Constitutive Laws for Engineering Materials, Prentice-Hall, pp.174~178.
13. Terzaghi, K. (1943), Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Son, New York, N.Y. pp.230~231.