

벤토나이트에 근입된 앵커의 흡입력에 관한 실험적 연구

이 준 대

세명대학교 토목공학과
(2001. 4. 7. 접수 / 2001. 6. 13. 채택)

An Experimental Study on Suction Force of Plate Anchor Embedded in Bentonite

Jun-Dae Lee

Department of Civil Engineering, Semyung University
(Received April 7, 2001 / Accepted June 13, 2001)

Abstract : Anchors are often used in construction of foundations such as transmission towers to resist uplifting forces. When plate anchors are embedded in soft clay, they may undergo a deformation under the pressure of sustained load. In soft saturated clays, the suction force can be a large part of the ultimate uplift capacity. This study is to present recent laboratory model test results conducted to evaluate the nature of variation of the suction force for plate anchors with shear strength and embedment ratio. The ratio of F_s/Q_n versus H/D in bentonite decreases with the increase of the embedment ratio.

Key Words : uplifting forces, plate anchors, soft clay, sustained load, suction force, ultimate uplift capacity, shear strength, embedment ratio

1. 서 론

인발 저항력에 관한 기존 이론은 일반적으로 인발력이 작용할 때의 파괴면이 기초의 양단으로부터 수직으로 인발 되거나 원호형을 이루며 인발된다는 가정¹⁾에 기초를 두고 있다.

Vesic²⁾은 반무한이고 균질, 균등성 고체의 표면에 근접한 둥근 공동의 확장에 대한 문제를 연구한 바 있으며 Meyerhof³⁾는 실험실과 현장 실험 관찰에 기초를 두고 얇은 앵커와 깊은 앵커에 대한 띠와 원형 앵커의 극한 인발력을 추정하는 실험식을 유도하였으며 이것은 주로 견고한 점토에 근입된 앵커에 대해 일반적으로 적용되고 있다.

그리고 Das⁴⁾는 여러가지 한계 근입비와 포화 점토에 근입되어 있는 얇은 앵커에 대한 실험식을 제안한 바 있으며 Ninomiya⁵⁾, Wang⁶⁾ 그리고 Baba⁷⁾ 등은 점토에서의 흡입 효과에 대한 여러 가지 연구 결과를 발표한 바 있다.

지금까지의 앵커의 사용은 옹벽이나 널말뚝의 안정에 기여하기 위하여 주로 쓰여 왔지만 최근에는 인간의 활동 영역 확장에 따른 해저 공간의 개발에 따른 각종 구조물의 안정에 사용됨으로써 그 사용이 더욱 증가하고 있는 추세이다.

지금까지의 연구에 따르면 판 앵커의 인발력은 흙의 종류, 함수비와 지반조건, 앵커의 종류에 따라 상이하게 나타나며 많은 이론식과 실험 결과가 발표되고 있지만 그 대부분이 사질토를 중심으로 발전하여 왔다. 그러나 시공성 혹은 경제성 등으로 인하여 점토상에 앵커를 설치해야만 하는 경우가 발생할 수 있으며, 이와 같은 필요성에 따라 점토에 근입된 앵커에 관한 연구^{8,9)}가 최근에 이르러 시도되고 있다.

II. 앵커의 인발 이론

2.1. Vesic 이론

공동 현상의 연구와 관련하여 Vesic은 반무한이

고 균질이며 등방인 고체의 지표면에 근접한 구형 공동의 확장 문제를 연구했다.

Fig. 1에서 만일 깊이 H 가 상당히 작다면 여기에는 공동 위에 있는 흙을 밀어낼 극한 하중 P_0 가 있을 것이며 이때 둥근 공동의 지름은 D 가 되고 사면경사 ab 와 cd 는 공동 a 와 c 를 접하는 선이 될 것이다.

b 와 d 점에서 각 $\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$ (ϕ = 흙의 마찰각)가 되며 평형 방정식에 의하여 수직 방향에서의 힘의 성분을 더함으로써 공동에서의 극한 하중 P_0 를 결정할 수 있다.

$c-\phi$ 흙에서 단기 극한 하중은 다음과 같다.

$$P_0 = cF_c + \gamma H \bar{F}_q \quad (1)$$

여기서, γ : 흙의 단위중량
 F_c 와 \bar{F}_q : breakout 요소
 c : 흙의 점착력

$$\bar{F}_q = 1.0 - \frac{2}{3} \left\{ \frac{(D/2)}{H} \right\} + C_1 \left\{ \frac{H}{(D/2)} \right\} + C_2 \left\{ \frac{H}{(D/2)} \right\}^2 \quad (2)$$

$$F_c = C_3 \left\{ \frac{H}{(D/2)} \right\} + C_4 \left\{ \frac{H}{(D/2)} \right\} \quad (3)$$

여기서, C_1, C_2, C_3, C_4 : 마찰각 (ϕ)의 함수

만일 앵커 판 위에 있는 반구형태의 공동이 흙으로 채워져 있다면 흙의 무게는

$$W_3 = \frac{2}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \gamma \quad (4)$$

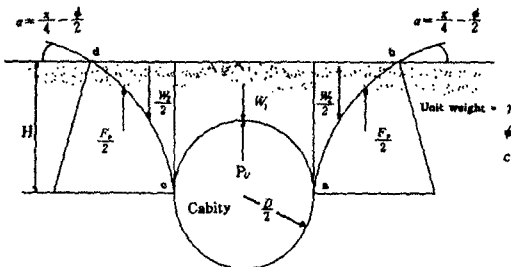


Fig. 1. Vesic's theory of expansion of cavities

이 흙의 무게는 P_1 에 의한 압력에 의하여 증가 될 것이다.

$$P_1 = \frac{W_3}{\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2} = \frac{\left(\frac{2}{3} \right) \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3 \gamma}{\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2} = \frac{2}{3} \gamma \left(\frac{D}{2} \right) \quad (5)$$

인발에 필요한 앵커의 단위면적 힘은

$$q_n = cF_c + \gamma H \left[1 + C_1 \left\{ \frac{H}{(D/2)} \right\} + C_2 \left\{ \frac{H}{(D/2)} \right\}^2 \right] = cF_c + \gamma H F_q \quad (6)$$

$c-\phi$ 흙에서 단기 순 극한 인발력은

$$Q_n = A(\gamma H F_q + cF_c) \quad (7)$$

여기서, A : 앵커 판의 면적

F_q 와 F_c : breakout 요소

포화 점토($\phi = 0$)이므로 $F_q = 1, c = c_u$

$$Q_n = A(\gamma H + c_u F_c) \quad (8)$$

2.2. Das 이론

Das는 여러 가지 한계 근입비와 포화 점토에 근입 되어있는 얇은 앵커에 대한 breakout 요소를 고려한 이론적 예측이 인발되는 동안 인장균열의 진행으로 인하여 어렵기 때문에 앵커의 단기 극한 인발력에 대한 많은 실험 결과를 수집하고 이 결과에 기초를 둔 실험식을 제안한 바 있다.

한계 근입비에 대하여:

$$(H/D)_{crS} = 0.107 c_u + 2.5 \leq 7 \quad (9)$$

$$(H/D)_{crR} = (H/D)_{crS} [0.73 + 0.27(L/D)] \leq 1.55 (H/D)_{crS} \quad (10)$$

여기서, $(H/D)_{crS}$: 정사각형과 원형 앵커에 대한 한계 근입비

$(H/D)_{crR}$: 직사각형 앵커의 한계 근입비

L : 직사각형 앵커 판의 길이
 L/D ≥ 3에 대하여

$$(H/D)_{crR} \approx 1.55 (H/D)_{crS} \quad (11)$$

이러한 실험 결과에 기초를 두고 Das는 얇은 앵커와 깊은 앵커에 대한 breakout 요소를 구하는 경험적 관계를 제안했으며 이러한 관계 α' 와 β 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha' = \frac{(H/D)}{(H/D)_{cr}} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{F_c}{F_{cr}^*} \quad (13)$$

여기서, F_{cr}^* : $(H/D)=(H/D)_{cr}$ 에서 최대 breakout 요소

또한 Das는 직사각형에서 다음을 제안하였다.

$$F_{cr}^* = 7.56 + 1.44(D/L) \quad (14)$$

여기서, F_{cr}^* : 직사각형 앵커의 최대 breakout 요소

III. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 앵커판과 앵커강봉으로 연결된 앵커체, 점토를 지지하고 있는 강제상자, 하중을 전달할 수 있는 하중전달장치와 변형을 측정할 수 있는 변위기록장치로 구성되어 있다.

앵커판은 토층에서 인발될 때 발생할 수 있는 압축력이나 휨에 충분히 저항할 수 있도록 강성의 원형 플라스틱으로 제작되었으며 지름 50mm, 두께 13mm이다.

앵커판 중심부에는 앵커강봉을 연결하였으며 이 음부는 나사를 이용하여 연결부의 파손과 인장으로 인한 이탈을 방지하였다.

실험은 길이 830mm, 폭 830mm, 높이 900mm의 강제 상자 속에 넣어진 직경 350mm, 높이 500mm인 원형의 용기 속에서 이루어졌으며 실험을 실시하는 동안 하중이 단계적으로 추에 가해지고 하중에 대

한 인발거동은 LVDT로 측정되었다.

3.2. 시료의 성질

본 실험에 사용된 시료는 점토 광물의 가장 뚜렷한 특성을 나타내고 있는 벤토나이트이다. 화산재가 풍화되어 생성된 비교적 순수한 벤토나이트는 팽윤성이 강한 점토로서 주성분 광물은 몬모리로나이트이며 수중에서 분산되면 점성과 비중이 증가하는 특성을 지니고 있다. 특히 함유량이 많을 경우에는 아교상이 되는 성질을 지니고 있어 차수벽 혹은 공벽보호에 널리 사용되고 있으며, 사용 시료의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

모형 실험은 전단강도가 서로 다른 2종류의 포화된 벤토나이트 시료에서 이루어졌으며, 성형된 시료의 강도는 베인전단시험기로 측정하였다. 벤토나이트의 토질 특성은 Table 2와 같다.

3.3. 실험 방법

실험을 위해 준비된 시료는 일정한 함수비를 갖도록 물로 반죽되어 플라스틱통에 넣어지고 일주일 동안 습윤상태로 양생하였다. 앵커의 실험을 시작하기 위하여 용기를 준비하고 습윤토를 플라스틱 통에서 꺼내어 압축시키며 25mm 두께의 층으로 일정한 높이까지 쌓은 후 24시간 동안 양생하였다. 전단 강도를 서로 달리한 2개의 시료를 준비하고 포화된 각각의 시료에 대하여 근입비가 1, 2, 3, 4, 5일 때의 영향을 비교하였다.

실제 지반에서 앵커를 인발할 때 발생하는 점토의 흡입력을 구하기 위해 앵커 바닥에 공기 구멍이 없도록 하여 앵커가 압축된 점토 위에 직접 놓여지도록 하였다. 흡입 효과에 대한 실험으로 흡입력을 구하고 전단 강도, 근입 깊이 등이 점토의 흡입력에 미치는 영향을 고찰하였다.

Table 1. Physical properties of clay minerals

| Sample | LL(%) | PL(%) | PI(%) | G _s |
|-----------|-------|-------|-------|----------------|
| Bentonite | 148.5 | 45.8 | 102.7 | 2.74 |

Table 2. Properties of bentonite

| | w (%) | c _u (t/m ²) | γ (t/m ³) |
|----|-------|------------------------------------|-----------------------|
| B1 | 95.0 | 0.415 | 1.390 |
| B2 | 105.0 | 0.306 | 1.348 |

IV. 실험결과 및 분석

4.1. 하중 변화에 따른 변위

점토에 근입된 앵커의 단기 극한 인발력에 대한 하중과 변위의 관계를 알기 위하여 벤토나이트(B1, B2)에 대하여 근입비를 변화 시켜가면서 변위를 측정하였다. 벤토나이트에 대한 하중과 변위의 관계는 Fig. 2 및 Fig. 3에서와 같다.

B1에서 각 근입비에 대한 하중은 근입비가 1일 때 1.3kg부터 변위가 발생하여 2.1kg일 때 급격히 증가하고 근입비가 5일 때 3.6kg부터 변위가 발생하여 5.8kg일 때 급격히 증가하여 파괴되었다. B2에서도 각 근입비에 대한 하중은 근입비가 1일 때 0.5kg부터 변위가 발생하여 1.5kg일 때 급격히 증가하고 근입비가 5일 때 2.4kg부터 변위가 발생하며 4.6kg일 때 급격히 증가하여 파괴되었다.

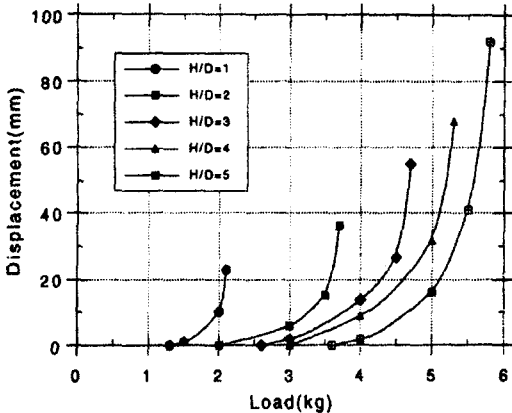


Fig. 2. Load-displacement curve in bentonite(B1)

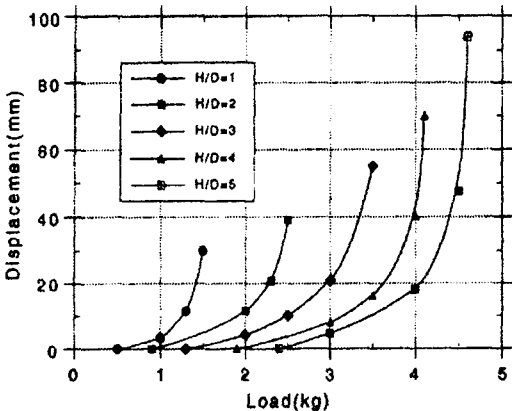


Fig. 3. Load-displacement curve in bentonite(B2)

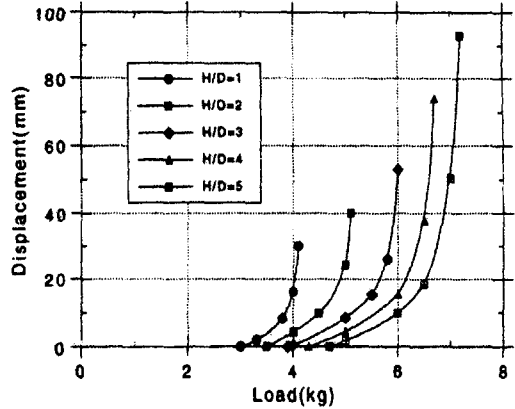


Fig. 4. Load-displacement curve with suction force in bentonite(B1)

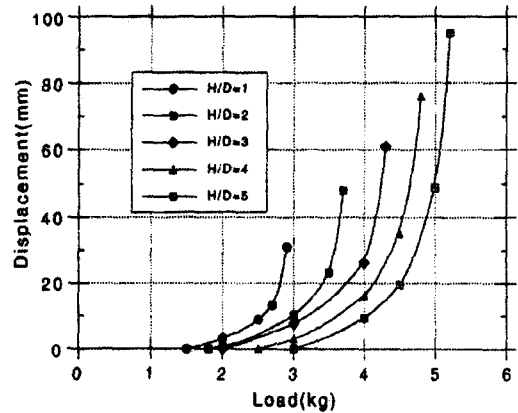


Fig. 5. Load-displacement curve with suction force in bentonite(B2)

벤토나이트의 흡입력에 대한 하중과 변위의 관계는 Fig. 4 및 Fig. 5에서와 같다. 흡입력을 포함한 B1에서의 각 근입비에 대한 하중은 근입비가 1일 때 4.1kg에서 변위가 급격히 증가하고 근입비가 5일 때 7.2kg에서 급격히 증가하여 파괴되었다. 흡입력을 포함한 B2에서의 각 근입비에 대한 하중은 근입비가 1일 때 1.5kg부터 변위가 발생하여 완만한 증가를 보이다가 2.9kg일 때 급격히 증가하고 근입비가 5일 때 3.0kg부터 변위가 발생하며 5.2kg일 때 급격히 증가하여 파괴되었다.

단기 극한 인발력은 앵커에서 갑작스럽게 인발되는 지점이나 실질적으로 선형이 되는 하중과 변위의 그림으로 정의되며 흙의 함수비가 감소함에 따라 그리고 근입비가 증가함에 따라 극한 인발력도 증가됨을 알 수 있었다.

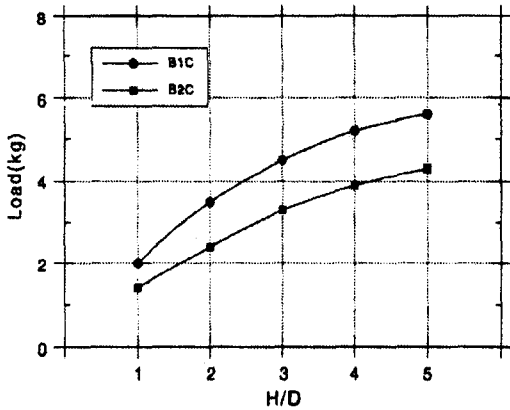


Fig. 6. Variation of Q_n with H/D in bentonite

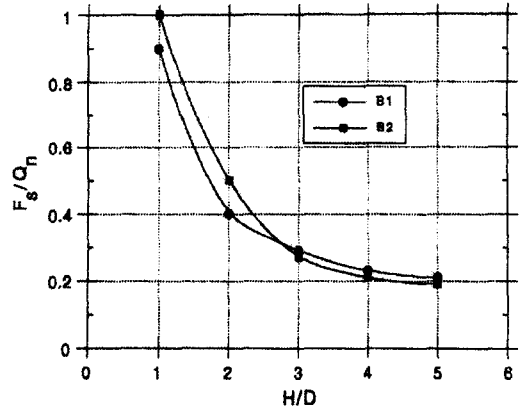


Fig. 8. Variation of F_g/Q_n with H/D in bentonite

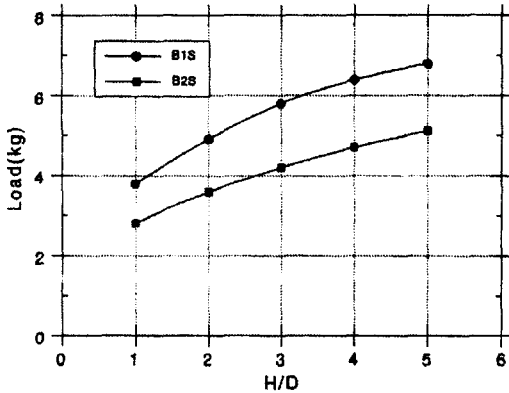


Fig. 7. Variation of Q_n+F_s with H/D in bentonite

4.2. 근입비에 대한 하중의 변화

Fig. 6은 벤토나이트에서 근입비에 대한 극한 인발력을 나타낸 것으로써 근입비가 1일 때 B1은 2.0kg, B2는 1.4kg이며 근입비가 5일 때 B1은 5.6kg, B2는 4.3kg으로 증가하였다. Fig. 7는 벤토나이트에서 근입비에 대한 흡입력을 포함한 극한 인발력을 나타낸 것으로써 근입비가 1일 때 B1은 3.8kg, B2는 2.8kg이며 근입비가 5일 때 B1은 6.8kg, B2는 5.1kg으로 증가하였다.

이와 같은 실험으로부터 벤토나이트에 대한 흡입력을 포함한 극한 인발력의 크기는 흡입력을 포함하지 않은 극한 인발력에서와 비슷하게 근입비와 함께 크게 증가되지만 점차로 완만하게 됨을 알 수 있었다.

4.3. 근입비에 대한 극한 인발력과 흡입력의 비

극한 인발력에서 점토의 흡입 효과를 알기 위해

여 근입비에 대한 극한 인발력과 흡입력의 비(F_g/Q_n)를 나타내었다. Fig. 8은 벤토나이트에서 근입비에 대한 F_g/Q_n 의 값을 나타낸 것으로써 근입비가 1일 때 B1은 0.90, B2는 1.00이며 근입비가 5일 때 B1은 0.21, B2는 0.19로 감소하였다.

이와 같은 실험으로부터 근입비가 증가할수록 흡입력의 영향은 크게 감소하여 인발력 증가에 별로 영향을 주지 않으며 전단강도와도 커다란 관계가 없다는 것을 알 수 있었다.

V. 결론

점토에 근입된 앵커의 인발 특성을 규명하기 위하여 벤토나이트에 대한 실내 모형 실험을 실시하였다. 단기 극한 인발력과 흡입력에 대한 연구 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 벤토나이트에 근입된 앵커는 전단 강도가 증가하거나 근입비가 증가함에 따라 단기 극한인발력도 급격히 증가하지만 점차로 완만하게 되었으며, Breakout 요소의 값은 근입비에 대해 최대값까지 증가되고 한계 근입비 이후에는 일정하게 되었다.
- 2) 벤토나이트에 대한 흡입력을 포함한 극한 인발력의 크기는 흡입력을 포함하지 않은 극한 인발력에서와 비슷하게 근입비와 함께 크게 증가하다가 점차로 완만해지는 경향을 나타내었다.
- 3) 근입비에 대한 F_g/Q_n 의 값은 근입비가 1일 때 B1은 0.90, B2는 1.00이며 근입비가 5일 때 B1은 0.21, B2는 0.19로 모두 근입비가 증가할수록 흡입력의 영향은 크게 감소하는 경향을 나타내었다.

참고문헌

- 1) Ali, M.S., Pullout Resistance of Anchor Plates and Anchor Piles in Soft Bentonite Clay, *MS thesis, Duke University, Durham, N.C.*, 1968.
- 2) Vesic, A.S., Breakout Resistance of Objects Embedded in Ocean Bottom, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 97, No. SM9, pp. 1183~1205, 1971.
- 3) Meyerhof, G. G., and Adams, J. I., The Ultimate Uplift Capacity of Foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 5, No. 4, pp. 225~244, 1968.
- 4) Das, B. M., and Puri, V. K., Holding Capacity of Inclined Square Plate Anchors in Clay, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 3, pp. 138~144, 1989.
- 5) Ninomiya, K., Tagaya, K., and Murase, Y., A Study of Suction and Scouring of the Sit-on-Bottom Type Offshore Structures, *Proceedings, The Fourth Offshore Technology Conference, Houston, Texas*, Vol. 1, pp. 869~879, 1972.
- 6) Wang, M. C., Demars, K. R., and Nacci, V. A., Breakout Capacity of Model Suction Anchors in Soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 14, No. 2, pp. 246~257, 1977.
- 7) Baba, H. U., Gulhati, S. K., and Datta, M. Suction Effect in Plate Anchors in Soft Clay, *Proc. XII Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg.*, Vol. 1, pp. 409~412, 1989.
- 8) 이준대, 최기봉, "인발력을 받는 Kaolinite 지반의 장기변위 특성에 관한 연구", *한국산업안전학회지*, Vol. 14, No. 2, pp. 116~121, 1999.
- 9) 이준대, 이봉직, "Kaolinite에 근입된 앵커에서 흡입력이 미치는 영향", *한국산업안전학회지*, Vol. 12, No. 4, pp. 108~113, 1997.