大韓土木學會論文集
第14卷 第5號 · 1994年 9月
pp. 1219~1227

Plate Anchor의 인발거동에 관한 모형실험

A Model Test on Uplift Behavior of Plate Anchor

金瑞星* · 李相德** · 具滋甲*** · 全夢角**** · 유건선*****
Kim, Seo Seong · Lee, Sang Duk · Koo, Ja Kap · Jeon, Mong Gak · Yoo, Keon Seon

Abstract

For Determination of the ultimate uplift capacity, the failure mechanism of the foundation by uplift should be correctly known. However, studies on the variation of the failure mechanism with the embedment ratio of anchor plate among those factors governing the uplift resistance are scarce. In this study, in an attempt to observe more clearly the variation of the failure mechanism with embedment ratio and to check applicability of existing formulae for the ultimate uplift capacity, a model test was performed with ground made of carbon rods, simulating a plane strain conditions. As a result, failure characteristics of shallow and deep anchor conditions were clearly classified. It was found that the analysis of a shallow anchor should be made prior to determination of the ultimate uplift capacity of a deep anchor.

요 지

앵커의 극한인발력을 결정하기 위해서는 인발에 의한 지반의 파괴기구를 정확하게 알아야 한다. 그러나 앵커의 인발저항에 영향을 끼치는 요소 중에서 묻힘비에 따른 파괴기구의 변화에 대한 기존의 연구가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 판앵커의 수직인발시 묻힘비에 따른 파괴기구의 변화를 보다 명확히 관찰하고, 기존의 극한인발력 산정식의 적용성을 판단하기 위하여 탄소봉으로 조성된 평면변형률상태의 지반에서 모형실험을 실시하였다. 그 결과로서, 얕은앵커상태와 깊은앵커상태일 때의 지반의 파괴특성을 명확히 구분할 수 있었으며, 깊은앵커의 극한인발력의 산정에 앞서 얕은앵커의 해석이 선행되어야 한다는 것이 증명되었다.

1. 서 론

앵커는 기초구조물에 작용하는 인발하중에 저항하기 위해 설치된다. 초기에는 흙막이 구조물등의 붕괴를 일시적으로 막는 가설물로 이용되었지만 지금은 영구구조물의 일부로 사용되고 있으며, 경제적인 설계와 공간활용을 위하여 앵커공법의 적용이 더욱 확대되고 있다. 앵커는 기본적으로 plate앵커, helical앵커, grouted앵커로 구분되는데 본 실험은 plate앵커를 대상으로 한다. 앵커의 연직인발저항에

* 성균관대학교 토목공학과 대학원 석사과정
** 정회원 · 아주대학교 공과대학 토목공학과 부교수
*** 정회원 · 안성산업대학교 토목공학과 전임강사
**** 정회원 · 성균관대학교 공과대학 토목공학과 교수
***** 정회원 · 동명기술공단 상무이사

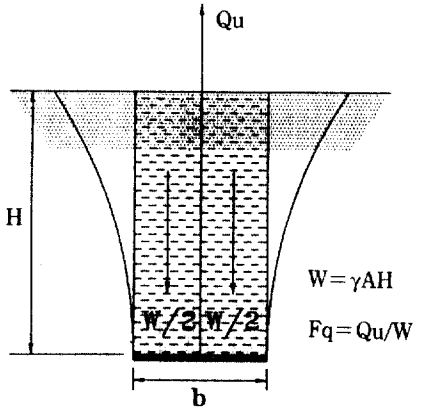

그림 1. 얕은앵커상태의 파괴메카니즘

γ : 흙의 단위중량　　W : 토피하중
A : 판앵커의 면적　　Q_u : 극한인발력
H : 묻힘깊이　　F_q : 파괴계수

영향을 끼치는 요소는 앵커의 크기와 모양, 지반의 상태, 그리고 묻힘깊이이다. 기존의 연구는 앵커의 크기와 지반의 상태의 영향에 대해서는 비교적 상세하게 언급하고 있지만 묻힘깊이의 변화에 따른 파괴기구에 대한 연구는 아직 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 판앵커의 파괴기구를 명확히 관찰하기 위하여 탄소봉으로 모형지반을 조성해서 앵커의 크기에 대한 묻힘깊이의 비의 변화에 따른 파괴기구를 규명하고, 극한인발력의 산정에 대한 기존 이론식의 적용성을 실험적으로 연구했다.

2. 판앵커의 인발에 따른 주변지반의 파괴기구

먼저 판앵커의 인발에 따른 주변지반의 파괴기구에 대하여 간략히 설명한다.

그림 1은 얕은앵커상태의 파괴기구를 나타낸 것이다. 여기서 폭 b에 대한 묻힘깊이 H의 비를 묻힘비(H/b)라 한다. 판앵커는 묻힌 깊이에 따라 두가지 파괴양상을 보이는데, 그림 1과 같이 묻힘비가 상대적으로 작아서 판앵커의 모서리부분에서 발생한 전단파괴면이 지표면까지 확장되는 상태를 얕은앵커상태(shallow anchor condition)라고 한다. 반면에 묻힘비가 상대적으로 커서 전단파괴면이 지표면까지 확장되지 않는 상태를 깊은앵커상태(deep anchor condition)라고 한다.

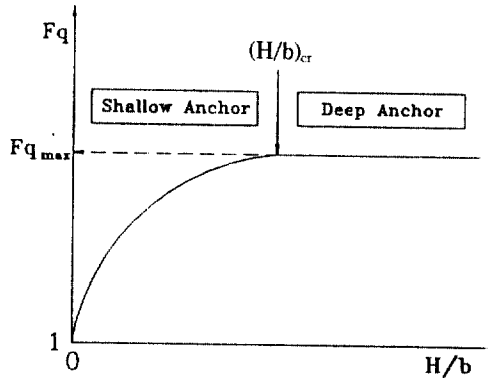

그림 2. 묻힘비(H/b)에 따른 파괴계수(F_q)의 변화특성

깊은앵커와 얕은앵커는 무차원 파괴계수(fraction factor) F_q의 값으로부터 구분할 수가 있다. 파괴계수(F_q)란 앵커의 극한인발력(Q_u)을 판앵커에 걸린 토피하중(γAH), 즉 판앵커 위의 연직 흙기둥하중으로 나눈 값이다.

그림 2에서 보는바와 같이 파괴계수는 판앵커가 지표면에 가까울 때, 즉 묻힘비가 0에 가까울 때 거의 1이다. 파괴계수가 1이라는 것은 극한인발력과 토피하중이 같다는 것을 의미한다.[1] 파괴계수는 묻힘비와 함께 증가하다가 어떤 묻힘비에 이르러 일정한 값을 가지게 되는 것을 볼 수 있는데, 이 때의 묻힘비를 한계 묻힘비 $(H/b)_{cr}$라고 한다.[2] 이것은 임의의 형태나 크기의 판앵커가 얕은앵커상태에서 가지고 있는 최대의 극한 인발지지력을 한계묻힘비에 이르러서 발휘하고, 만약에 묻힘비가 이것보다 크게 되면 깊은앵커로서 거동한다는 것을 의미한다.

Mors(1959)[3], Meyerhof and Adams(1968)[4], Vesic(1971)[5], Saeedy(1987)[2] 등은 그림 3과 같이 비교적 단순한 파괴기구를 가정해서 모래지반에 묻힌 판앵커의 극한인발력을 결정하기 위한 식을 제안하였다.

여기서 대부분의 이론들은 원형앵커에 대한 것이며, 얕은앵커상태가 되는 묻힘비의 범위는 $H/b \leq 5$라고 가정[2]하였으나, Meyerhof and Adams[4]는 평면변형률상태의 띠앵커해석을 통해 직사각형앵커를 다루었으며, 그림 4와 같이 한계묻힘비를 흙의 내부마찰각 φ의 함수로 보았다.

3. 모형실험의 Scale Effect

모래지반에 묻힌 판앵커의 극한인발력결정을 위한

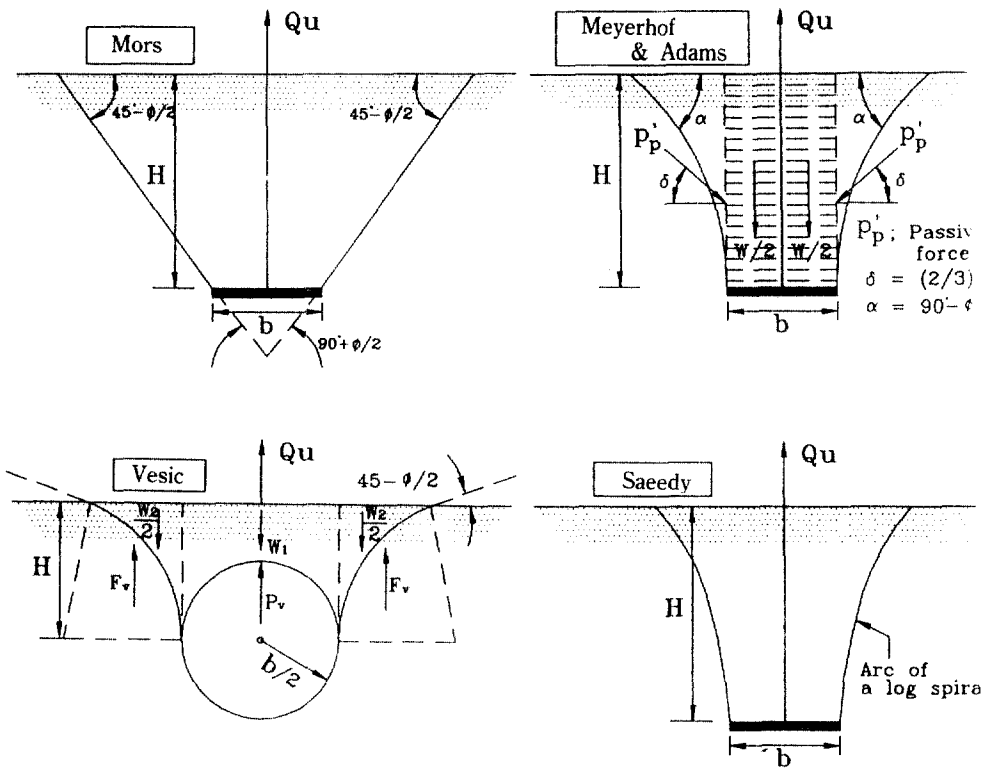

그림 3. 얕은앵커상태의 가정된 파괴메카니즘들

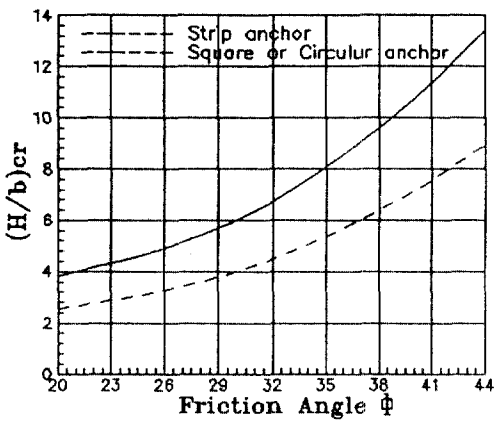

그림 4. 내부마찰각에 따른 한계묻힘비의 변화(Meyerhof and Adams)

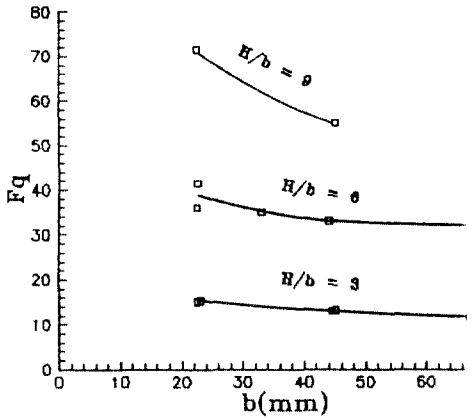

그림 5. Baker and Kondner(1966)에 의해 시행된 앵커모형실험결과

다양한 이론들이 있고, 이 이론들을 입증하기 위하여 여러학자들이 축소된 크기의 모형실험을 했다. 그런데 이 실험들은 일반적으로 2 cm에서 10 cm 정도의 폭을 가진 모형판앵커로 실시된 것이다. 모형실험은 일반적으로 실제보다 지지력을 과대평가하는데, 이것은 scale effect에 기인한다.[1]

그림 5는 Baker and Kondner[6]에 의해 시행된 모형실험의 결과를 나타낸 것으로, 내부마찰각이 42°, 단위중량이 1.87tf/m^3, 그리고 점착력이 0인 조밀한 모래지반에서 묻힘비를 고정하고 판앵커의

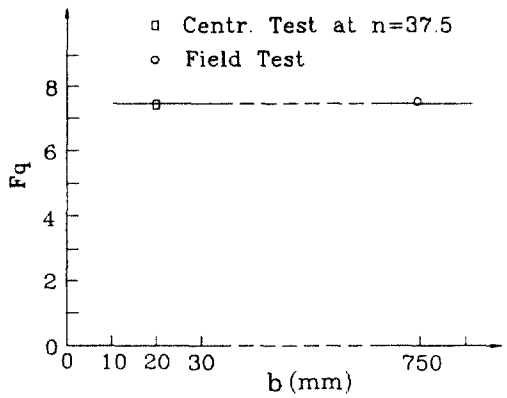

그림 6. 현장시험과 centrifuge모형 실험결과의 비교

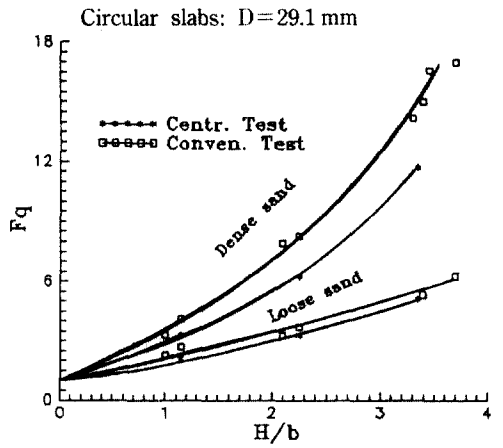

그림 7. 일반적인 앵커모형실험과 centrifuge모형 실험결과의 비교

폭을 변화시키면서 각각 묻힘비 3, 6, 9에 대하여 실험한 것이다. 파괴계수는 판앵커의 폭이 작을수록 크고, 판앵커의 폭이 60 mm 이상에서 일정한 값에 가까와지고 있다. 이러한 scale effect는 묻힘비가 클수록 더 심각해진다는 것을 그래프를 통해 알 수 있다.

Ovesen[1]은 일반적인 모형실험의 scale effect를 규명하기 위하여 centrifuge모형실험을 시행하였다. 시행된 모형실험의 기본개념은 실제와 같은 모래지반에서 모형앵커를 1 : n의 비율로 축소하고, ng(g ; 중력가속도)의 인위적인 중력가속도를 받도록 하는 것이다. 파괴계수의 결정에 영향을 미치는 요소중에서 묻힘비(H/b), 간극비(e), 내부마찰각(ϕ), 무차원화한 탄성계수(E/γb) 등은 비슷하였으나 무차원화한 입자의 크기(d/b)는 실제와 달랐다. 같은 모래지반에서 일정한 묻힘비의 앵커에 n값을 변화시키면서 예비실험한 결과 거의 같은 파괴계수를 얻었으며, 그림 6과 같이 앵커판의 폭이 750 mm인 현장실험과 앵커판의 폭이 20 mm인, 즉 n=37.5인 centrifuge 모형실험을 실시한 결과 scale effect가 거의 없었다.

그림 7은 centrifuge모형실험의 결과와 일반적인 모형실험의 결과를 비교한 것으로서, 묻힘비(H/b)가 큰 조밀한 모래에서의 일반적인 모형실험일수록 판앵커의 극한인발력을 과대평가하고, 느슨한 모래일수록 scale effect가 작다는 것을 알 수 있다.

모형실험은 실제보다 훨씬 낮은 응력수준에서 시행된다. 그런데 실제로 Mohr의 파괴포락선은 그림 8과 같이 응력이 증가함에 따라 기울기가 감소하는 곡선을 이룬다. 이것은 모형실험에서의 내부마찰각

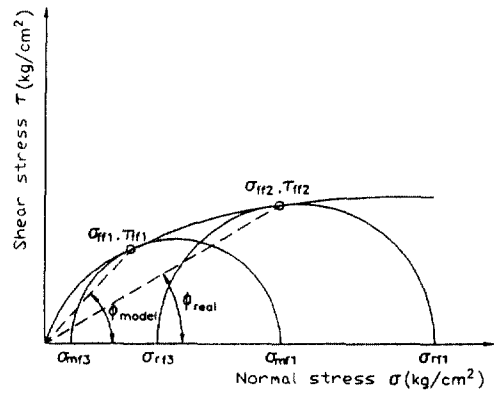

그림 8. Mohr의 파괴포락선

ϕ_{model}이 실제응력수준에서의 내부마찰각 ϕ_{real}보다 크다는 것을 의미하며, 아래의 식 (2)으로 표시할 수 있다.

$$\phi_{real}=\tan^{-1}\left(\frac{\tau_{ff2}}{\sigma_{ff2}}\right)<\phi_{model}=\tan^{-1}\left(\frac{\tau_{ff1}}{\sigma_{ff1}}\right) \quad (2)$$

이상의 관찰에서, 설계에 적용하기 위한 모형실험에서의 내부마찰각 ϕ의 선정에 있어서 신중한 고려가 필요함을 알 수 있다.

4. 실험장치

모형실험에 사용한 탄소봉은 길이가 55 mm, 직경이 각각 4 mm, 6 mm, 8 mm인 3종류로 단위중량이 약 1.4 tf/m³, 내부마찰각이 27° 정도, 그리고

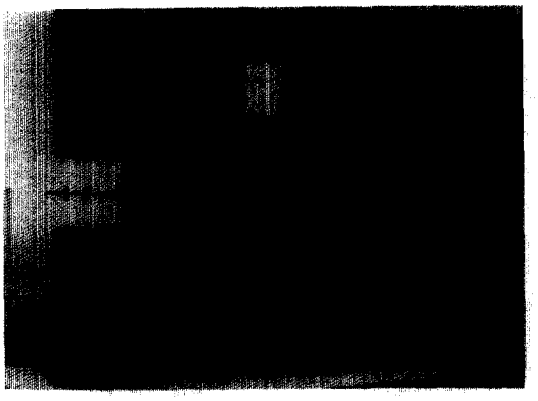

그림 9. 수동파괴실험장치

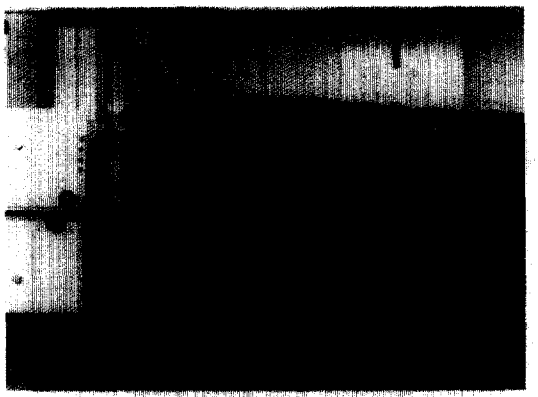

그림 10. 촬영된 수동파괴형상

점착력이 0인 느슨한 모래지반상태를 구현한 것이다. 단위중량은 미리 각 탄소봉의 무게를 측정한 다음, 탄소봉지반의 일정영역을 무작위로 선정하여 구한 값이다. 내부마찰각은 벽체에 횡하중을 가해서 수동파괴시키는 실험을 통하여 구하였다. 수동파괴실험장치는 그림 9와 같이 벽체의 양측면에 도르레를 부착하여 벽체의 기울음을 억제시키고 수평변위만을 허용하였으며, 벽체와 모형지반사이에 윤활류를 바른 이중의 비닐막을 두어 마찰저항을 최소화하였다. 단계별로 횡하중을 가하면서 전과정을 그림 10과 같이 한장의 사진으로 촬영하여 수동파괴각을 확인하는 한편, 재하된 횡하중을 역계산하여 모형지반의 내부마찰각을 구하였다.

모형틀의 내부의 크기는 1400 mm×1000 mm, 폭은 100 mm, 그리고 사용된 다자 형강은 100 mm×50 mm×5 mm이다. 그리고 모터와 기어박스를 이용한 앵커의 인발속도는 약 1.44 mm/min로 조정했다.

앵커의 상부에 설치한 load cell과 LVDT(linear variable differential trans-formers)로 각각 인발력과 수직변위를 측정했고, 그림과 같이 양쪽에 등간격의 LVDT를 2개씩 설치하여 표면변위를 측정했다.

감도가 1g인 load cell과, 감도가 1/100 mm인 LVDT로 측정된 data는 UPC(universal personal computer sensor interface card)를 통해서 퍼스널 컴퓨터에 입력된다. 사용된 판앵커의 폭은 70 mm이고, 편심이 걸리는 것을 방지하기 위해 그림 11과 같이 지름 5 mm의 강봉으로 연결하여 150 mm에서 700 mm까지 조절할 수 있도록 했다.

5. 실험결과 및 분석

실험은 묻힘비를 1씩 변화시키면서 묻힘비 2에서 7까지 실시했다. 특히 예상되는 한계묻힘비의 부근에서는 묻힘비를 0.5씩 변화시켰다.

그림 12는 각 실험의 인발력과 수직변위의 관계를 나타낸 것이다. 각 묻힘단계의 극한인발력은 Mansur and Kaufmann(1956)[7]의 방법으로 결정하였다. Mansur and Kaufmann의 방법은 하중-변위곡선의 초기접선과 최종접선의 교점으로 극한하중을 구하는 방법으로, 하중-변위곡선의 기울기가 최소에 접근하는 점으로 극한하중을 결정하는 Vesic의 방법에 비하여 약간 작은 값을 보인다. 실험을 통한 인발력-수직변위그래프가 매끄럽게 나타나지 않기 때문에 data들의 경향을 나타내는 곡선을 그려서 초기접선과 최종접선의 교점으로 극한하중을 구하였다. 묻힘비가 6인 실험에 대하여 극한하중을 결정한 例가 점선으로 나타나 있다.

B.M. Das(1990)의 Earth Anchor에서 적용할 만한 이론으로 권하고 있고, 현재 직사각형 앵커의 극한인발력의 예측에 주로 사용되는 Meyerhof and Adams의 이론치와 실험결과를 비교하면 그림 13과 같다.

실험결과 한계묻힘비는 Meyerhof and Adams의 이론치보다 조금 작은 약 5 정도로 나타났지만, 한계묻힘비에서의 파괴계수인 최대파괴계수는 0.2 정도 더 크게 나타났다.

그림 14는 묻힘비 2와 4 그리고, 5.5와 7의 실험에 대한 앵커의 수직변위와 모형지표면수직변위의 관계

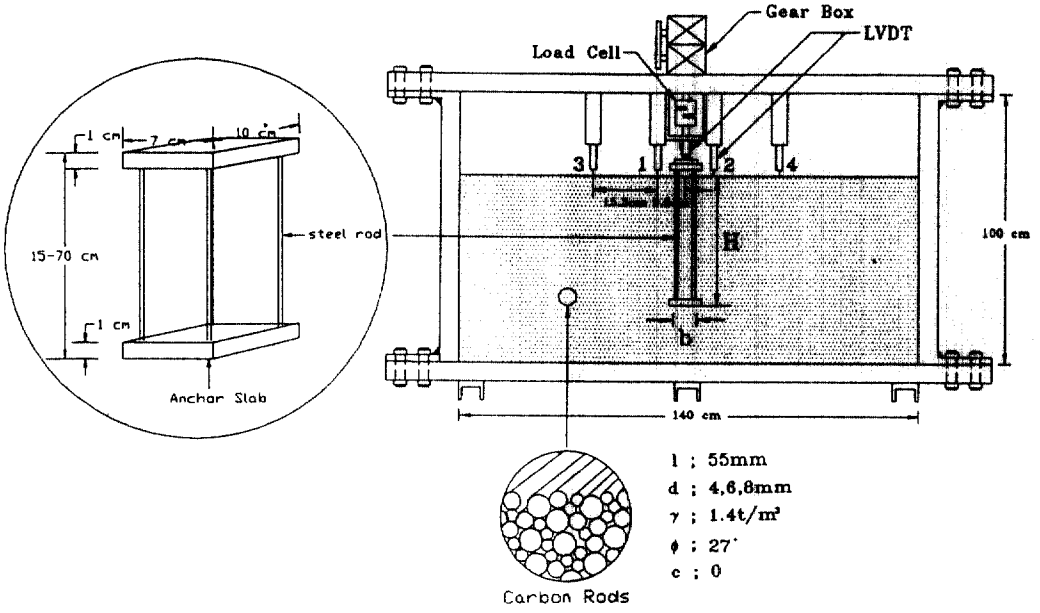

그림 11. 모형실험개략도

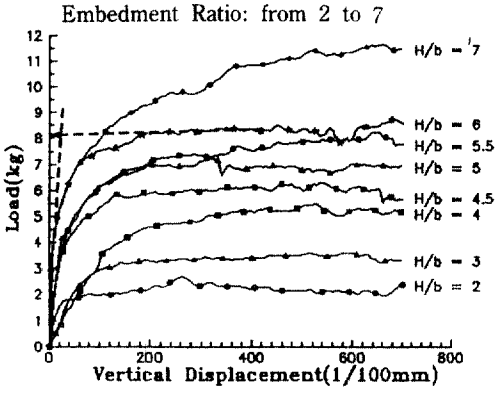

그림 12. 묻힘비에 따른 인발력-앵커수직변위

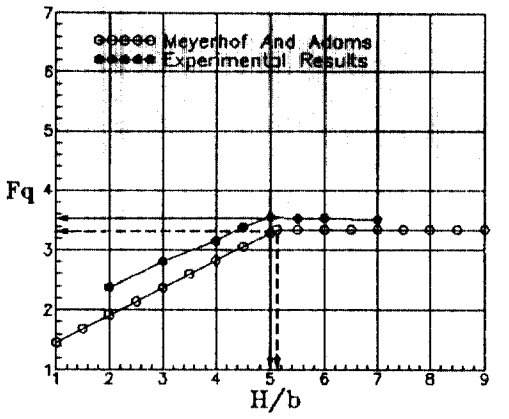

그림 13. Meyerhof and Adams의 이론치와 본 실험치의 비교

그래프들로서 앵커의 인발과정에서 편심이 거의 걸리지 않았음을 보여주고 있다.

최대파괴계수를 결정하는 한계묻힘비는 실험결과에서 나타나는 지반의 파괴형상을 통하여 입증할 수 있다. 지반의 파괴형상은 실험을 진행하면서 사이를 두고 노출시켜서 실험 전체를 한사진에 담은 것이다.

그림 15는 묻힘비가 4.5인 얕은앵커상태의 파괴형상으로, 초기에 앵커의 모서리에서 발생한 전단파괴면이 지표면까지 확장되었음을 볼 수 있다. 관찰된 파괴형상은 그림 3에서 여러학자들이 가정했던 단순한 파괴형상들과는 어느 정도 차이가 있었으며, X/H는 그림 16과 같이 묻힘비가 클수록 작아져서 일정한 값에 접근하였는데, 이것은 느슨한 모래지반에서 나타나는 특징적인 파괴양상으로 사료된다.

그림 17은 묻힘비가 6.5인 깊은앵커상태의 파괴형상으로, 초기에 앵커의 모서리에서 발생한 전단파괴면이 얕은앵커상태와 비슷한 양상으로 확장되다가 표면까지 이르지 못하고 앵커주변에 국부적인 파괴가 두드러지게 발생함을 관찰할 수 있는데, 이런 국부전단파괴의 원인은 상대적으로 마찰각이 작은 지반에서 앵커의 인발력이 상재하중을 극복하지 못

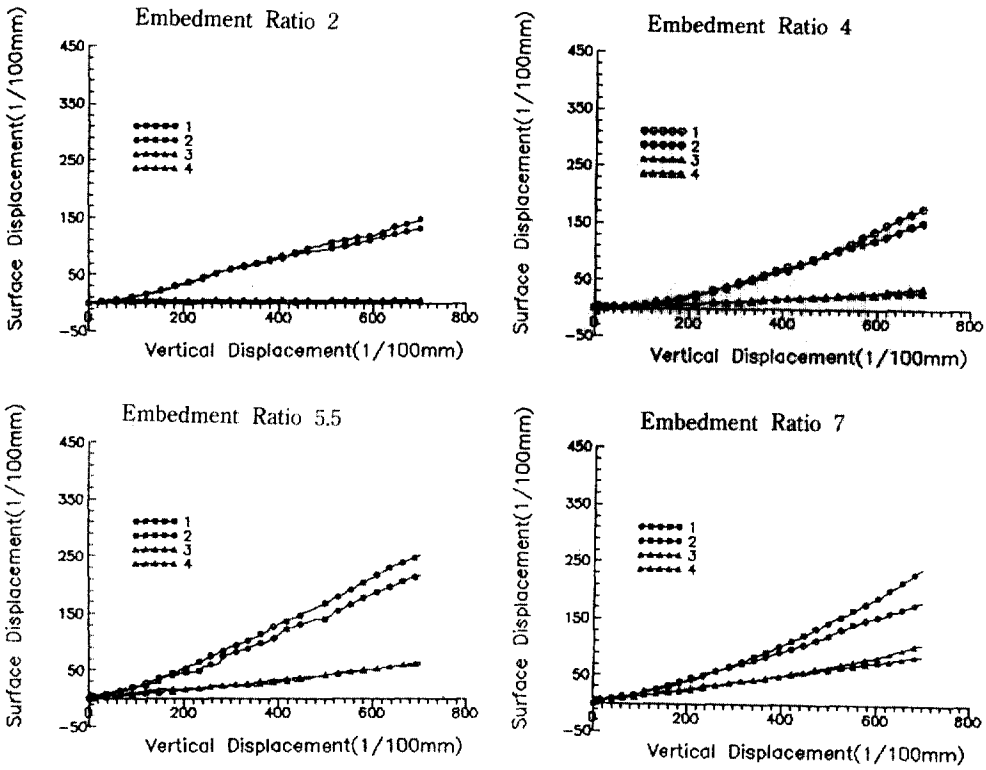

그림 14. 앵커-모델지표면수직변위

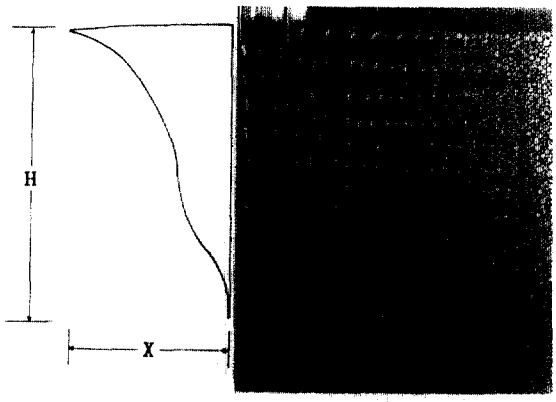

그림 15. 얕은앵커상태의 파괴형상(묻힘비(H/b)=4.5)
X : 앵커모서리에서 지표면과 파괴면의 교차점까지의 수평거리

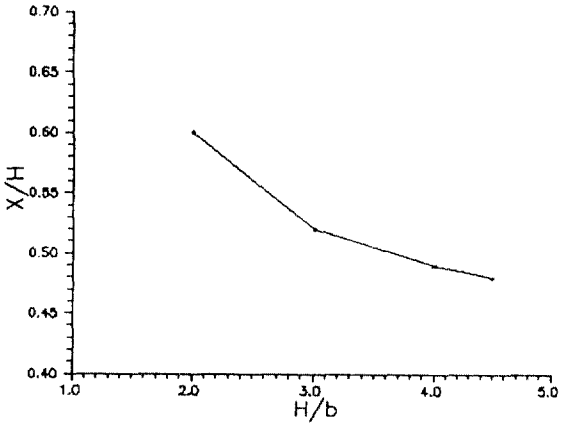

그림 16. 얕은앵커상태의 묻힘비에 따른 X/H의 변화

하기 때문으로 여겨진다.

앵커의 파괴해석에서 파괴계수는 얕은앵커상태에서 묻힘비에 따라 증가하다가 한계묻힘비에 이르러서 일정한 값을 갖게 되기 때문에 얕은앵커의 파괴형상분석을 통하여 깊은판앵커의 극한인발력(Q_u) 결정도 할 수 있다. 즉, 한계묻힘비에 이르러 파괴계수 F_q가 일정해지는 깊은앵커상태가 되면 극한인발력은 묻힘깊이에 의해 결정된다.

그림 18은 깊은앵커상태를 간략히 나타낸 것으로서 아래의 식 (2)을 통하여 깊은판앵커의 극한인

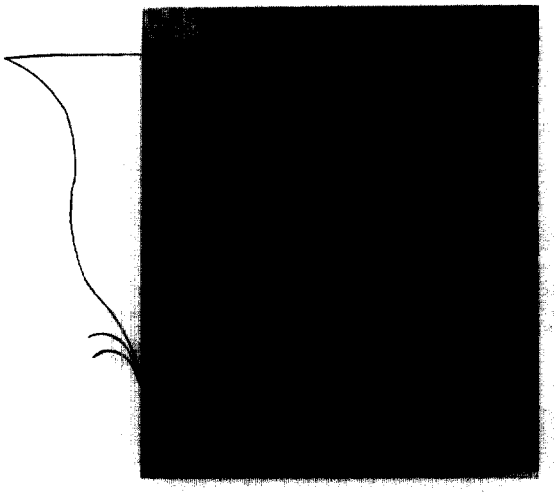

그림 17. 깊은앵커상태의 파괴형상(묻힘비(H/b)=6.5)

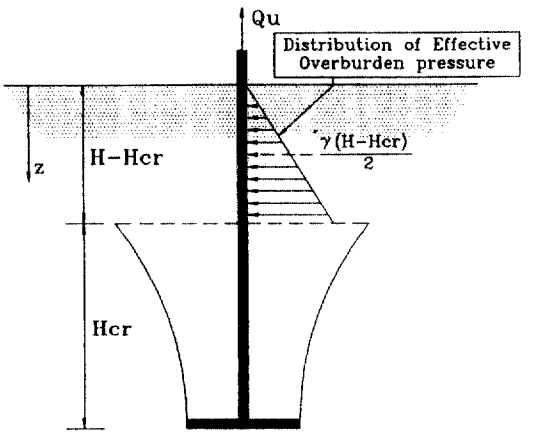

그림 18. 깊은앵커상태

발력을 산정할 수 있다.

$$Q_u = F_q \gamma AH + K_o p(H - H_{cr})'_{ave} \tan\delta (\delta/\phi < 1)$$

p : 앵커 shaft의 원주

σ'_{ave} : z=0에서 $z=H_{cr}-H$ 사이의 평균유효응력 $(=(1/2)\gamma(H-H_{cr}))$

K_o : 정지토압계수$(=1-\sin\phi)$

6. 결 론

앵커의 묻힘비에 따른 인발저항과 파괴기구을 규명하기 위하여 탄소봉으로 조성한 지반에서 앵커인발모형실험을 하고, 파괴의 형태를 사진으로 촬영하여 분석한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 느슨한 모래지반의 경우, 얕은앵커상태에서 묻힘비가 작을수록 (앵커모서리에서 지표면과 파괴면의 교차점까지의 수평거리)/(묻힘깊이)가 크게 나타난다.

둘째, 깊은앵커상태에서는 판앵커 주위에 국부전단파괴가 발생하는것을 확인하였다.

셋째, 느슨한 모래지반의 경우, Meyerhof and Adams에 의한 극한인발력의 산정은 어느 정도 안전측(conservative)이지만, 모형실험의 scale effect를 고려해볼 때 적용성이 있는 것으로 사료된다.

네째, 파괴계수는 일정한 묻힘비, 즉 한계묻힘비부터 일정하기 때문에 깊은앵커상태의 판앵커의 극한지지력을 결정하기 위하여 한계묻힘비에 대한 연구를 선행하여야 한다.

參考文獻

1. Ovesen, N.K., "Centrifuge Tests of the Uplift Capacity of Anchors", *Proc., 10th Int. Conf. on Soil Mechnics and Foundation Engineering,* Stockholm, Sweeden, Vol. I, 1981, pp. 717-722.
2. Das, B.M., *Earth anchor,* Elsevier, 1990, pp. 14-55.
3. Mors, H., "The Behaviour of Mast Foundtion Subject to Tensile force", *Bautechnik, No. 10,* 1959, pp. 367-378.
4. Meyerhof, G.G. and Adams, J.I., "The Ultimate Uplift Capacity of Foundations", *Can. Geotech J.,* 1968, pp. 225-244.
5. Vesic, S., "Breakout Resistance of Objects Embeded in Ocean Bottom", *Journal Soil Mech. Found. Div.,* ASCE, 1971, pp. 1183-1205.
6. Baker, W.H. and Kondner, R.L., "Pullout Load Capacity of a Circular Earth Anchor Buried in Sand", *Highway Res. Rec. 108,* National Academy of Sciences, 1966, pp. 1-10.
7. Salden D., "Der Einfluss der Sohlenform auf die Traglast von Fundamenten", MIT. 12, Baugrundinstitut UNI.Stuttgart, 1980, pp. 61-66.
8. Das, B.M., *Theoretical Foundation Engineering,* Elsevier, 1987, pp. 183-194.
9. Hanna, T.H., "Studies on Anchors and Anchor-supported Retaining Wall in Sand", Stress-strain Behavior of Soil, 1972, pp. 450-458.
10. James, R.G., "Some Aspects of Soil Mechanics

Model Testing", Stress-strain Behavior of Soil, 1972, pp. 417-440.
11. Merrifield, C.M. and Williams, A.R., "Pull-out Capacity and Load-displacement Characteristics of Vertical Anchorages Modelled in The Centrifuge", Centrifuge88, Balkema/Rotterdem/Brookfield, 1988, pp. 215-221.
12. Hunt Roy E., *Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation,* McGraw-Hill Book Co., 1986, pp. 430-438.
13. Kulhawy Fred H., "Uplift Behavior of Shallow Soil Anchor", Uplift Behavior of Anchor Foundation in Soil, ASCE, 1985, pp. 1-25.

(接受 : 1993. 12. 2)