

경사 지반앵커의 군효과에 대한 연구

A Study on the Group Effect of the Inclined Ground Anchor

임	종	철*1	김	상	윤*2
Im,	Jong-Chul		Kim,	Sang-Yoon	
홍	석	우*2	강	낙	안*3
Hong,	Seok-Woo		Kang,	Nak-An	

Abstract

The group effect of inclined ground anchor should be considered in design, but it has been hardly studied due to the difficulties of experimental or theoretical study.

In this study, the model tests for the inclined ground anchors are made, and the displacements and strain fields of ground around anchor surface are analysed. As the results of this study, the group effect of the inclined ground anchor in air dried sand ground does not show even though two anchor surfaces are very close(10.7cm, surface to surface). That is to say, in the case that the final failure surface by pullout of anchor shows on the anchor surface, the pullout resistances of single anchors are almost same as those of the group anchors in these model tests.

요 지

지반앵커의 설계시 가장 중요한 것은 극한인발력을 구하는 것이다. 앵커의 간격이 가까울 때는 앵커의 인발에 따른 지반 거동의 중첩 현상, 즉 군효과가 발생하여 앵커 1개당 극한인발력이 감소하게 된다. 현재까지 앵커의 군효과에 대한 연구가 극소수인데 그것도 대부분 연직 앵커에 관한 것으로 경사앵커에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 이 이유는 지반앵커의 인발에 따른 지반 거동의 관찰과 앵커표면 마찰응력을 정확하게 측정해서 분석할 수 있는 실험과 이론적 고찰이 대단히 어렵기 때문일 것이라고 생각한다.

본 연구는 공기 건조 모래지반 내에 설치된 경사 지반앵커의 군효과에 대한 모형실험에 관한 것으로, 앵커체 깊이 방향으로 부착된 10개의 변형률계이지에 의해서 앵커체 표면의 마찰응력을 구하여 군효과에 의한 마찰응력의 감소에 대해 분석하는 것이다. 실험 결과, 앵커표면간 거리가 10.7cm에 불과한 대단히 가까운 앵커의 경우에도 군효과에 의한 마찰응력의 감소와 극한인발력

*1: 정회원, 부산대학교 토목공학과 조교수

*2: 정회원, 부산대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*3: 정회원, 부산대학교 생산기술연구소 연구원

의 감소는 보이지 않았다. 그러나 본 연구는 전조모래 지반내의 소규모 실내모형실험에 한한 것이므로 이후 여러 가지 지반 조건하에서의 모형실험과 현장 실험을 실시해서 보다 일반적으로 적용될 수 있는 연구가 지속되어야 할 것이다.

1. 서 론

지반앵커(마찰방식 앵커의 경우)는 종래, 가설구조물로서 많이 사용되어 왔는데, 최근은 프리스트레스력에 의해 주변지반의 변형을 극소화 할 수 있다는 것과, 높은 용벽을 건설할 때의 단계적 절토에서의 사용공법으로서 장점이 많으므로 영구구조물로서 많이 사용되고 있다.

특히, 근래에는 집중호우로 인한 용벽의 붕괴, 산사태, 사면활동 등의 사고가 종종 발생하고 있고, 또한 택지의 부족으로 인해 산허리 부근까지 택지를 조성함으로써 높은 사면이 형성되어 붕괴의 위험성이 높아지고 있다. 이러한 곳에서의 안정대책으로 일반적으로 많이 사용되고 있는 지반앵커는 기존용벽의 보강공법으로도 시공이 용이하고, 사면에 설치함으로써 사면붕괴의 진행방지나 변형억제 등의 다른 공법으로는 얻기 어려운 장점이 있어, 국내 외적으로 그 사용이 계속 증가되고 있다.

지반앵커는 그 타설방향에 따라 연직지반앵커, 경사지반앵커로 나눌 수 있다(이하, '지반앵커'를 간단히 '앵커'라고 한다). 연직앵커는 해양구조물(해상건물, 沈埋터널 등), 지하수위가 높은 지반내의 구조물(지하철 등) 등과 같이 부력에 의해 상향력이 작용하는 구조물의 상향변위 억제 수단으로 잘 이용되고 있다. 또한, 앵커는 널말뚝, 용벽, 사면 등의 붕괴방지책으로 많이 사용되고 있는데, 이 때 주로 사용되는 앵커는 수평면과 어떤 각도를 이루는 경사앵커이다.

앵커를 설계할 때 가장 중요한 것은 앵커의 극한인발력을 구하는 것이다. 연직앵커의 극한인발력의 산정에 대해서는 실험과 이론적으로

비교적 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 경사앵커에 대해서는 앵커표면의 수직용력, 마찰각 등에 대한 연구가 대단히 적고, 또한 앵커 주변지반의 파괴모-드에 따른 극한인발력 산정식에 대해서는, 실험의 어려움으로 인해 그 연구는 거의 없다. 따라서 현재까지 경사앵커의 극한인발력 산정은 대략적인 경험치에 의존하고 있어, 적당한 안전율로서 위험을 어느 정도 무마하는 실정에 있다. 그리고 일반적으로 앵커는 다수 타설되므로, 인접앵커간의 거리가 가까우면 용력의 중첩(coupling)현상이 발생하여 앵커 1개당의 극한인발력은 감소하게 된다. 이것을 군효과(group effect)라고 하는데, 이를 무시하면 앵커 1개당의 극한인발력을 과대평가하게 되어 위험측의 설계가 되므로 설계시 대단히 중요한 고려사항이라는 것은 말할 필요도 없다.

연직앵커의 경우는 군효과에 대해 약간의 연구^{2,4,5)}가 되어 있어 설계에 어느 정도 참고가 되고 있으나, 경사앵커의 경우는 앵커표면의 마찰용력의 측정과 앵커 주변지반의 거동을 관찰하기가 어려우므로 현재까지 국내외적으로 경사앵커의 군효과에 대한 연구의 필요성은 절감하면서도 위와 같은 연구의 어려움으로 인해 연구가 제대로 진행되지 않고 있다.

본 연구는 이와 같은 점들을 감안해서, 실내 모형실험을 통해 공기 전조 모래지반 내의 강체 앵커의 인발에 따른 인발력을 측정하고, 앵커체 깊이 방향으로 부착된 10개의 변형률게이지로서 앵커체 각 위치에서의 마찰용력을 측정했다. 앵커체 직경은 9.3cm이며, 군효과에 의한 마찰용력의 영향을 알기 위해서 중심 간격이 20cm 및 40cm인 경우에 대해 실험을 행했다. 또 模型土槽의 측벽에 부착된 라텍스멤브레인

을 이용해서 앵커 주변지반의 거동을 관찰함으로써^{1,12)}, 앵커 인발에 따른 주변지반의 영향권을 분석하여 경사앵커의 균효과에 대한 기초 자료를 제공하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 종래의 연구

그림 1²⁾은 연직으로 설치된 ① 인장형 앵커

및 ② 압축형 앵커의 영향원추를 나타내고, ③ 인장형 앵커의 영향원추의 상호간섭에 대해 설명하고 있다. 현재, 균효과를 고려한 설계를 위해 확립된 방법은 없고, 단앵커(single anchor)의 극한인발력을 T_{ug} 라고 하면, 저감된 극한인발력 T'_{ug} 는 $T'_{ug} = \xi \cdot T_{ug}$ 로 해서 그림 2로부터 구하는 방법이 소개되어 있는 정도에 그치고 있다^{2, 4, 5)}.

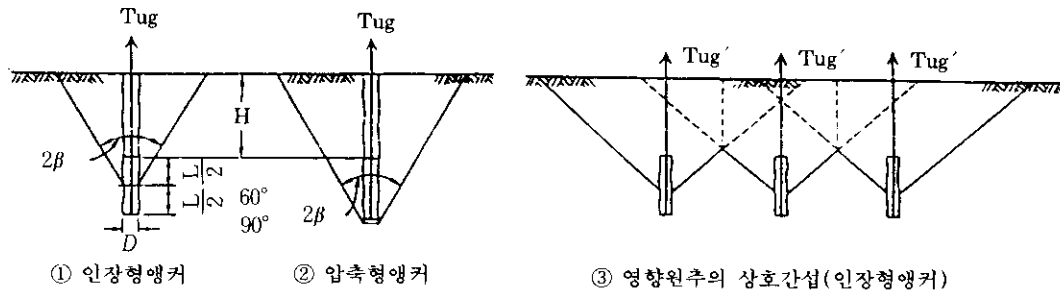


그림 1. 연직 앵커의 인발에 따른 영향 원추²⁾

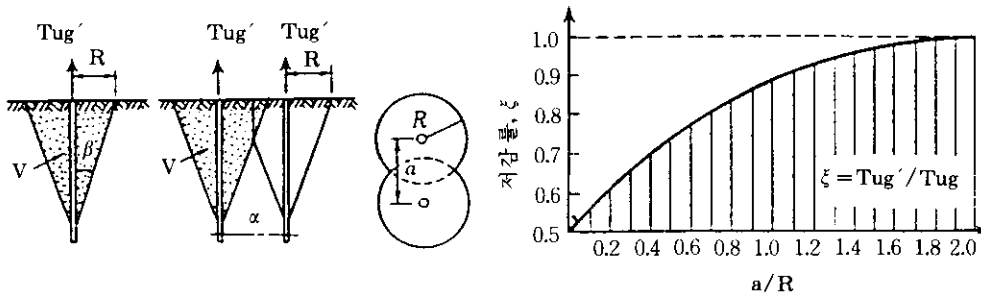


그림 2. 균효과에 의한 극한인발력의 저감률^{2, 4, 5)}

여기서, a : 앵커의 간격

R : 영향원추의 반경(앵커체장 및 앵커체 설치깊이, 그리고 β 에 의해 구함)

$\beta = (2/3)\phi$: 토사의 경우($\phi = 45^\circ$ 인 경우는 $\beta = 30^\circ$)

$\beta = 45^\circ$: 압반의 경우

$\beta = \nu_d$: 토사의 경우(林등^{9, 10, 11)}의 연구)

林등^{3, 6, 9, 10, 11)}에 의하면, 연직앵커를 인발하면

먼저 주변지반에 원추형 변형영역이 생기고, 결국은 거의 대부분 앵커체 표면에서 파괴면이 발달하게 된다. 즉, 극한인발력이 발휘될 때는 영향원추면에서의 저항력은 극한상태에 도달하지 않는다는 것이다. 그러나, 인접앵커간에 영향원추가 중복되면 균효과가 발생해서 인발 초기 단계에는 앵커 1개당의 인발력은 감소하게 된다.

따라서 인발 초기 단계는 인접 앵커 간에 영

항 원추가 중복되어 군효과가 발생하므로 앵커 한개당의 인발력은 감소하지만, 앵커체 표면에서 최종 파괴가 발생할 경우의 극한인발력은 군효과에 의한 수직응력 감소의 영향을 무시한다면(즉, 수직응력이 일정하다면), 군효과의 영향을 받지 않는 단앵커의 경우와 같다. 그러나 원추형파괴가 발생할 경우는 군효과의 영향으로 극한인발력은 단앵커의 경우보다 감소하게 된다. 위와 같이 중국에서의 파괴형은 알기 어려우므로 어떤 파괴형의 경우라도 군효과의 영향을 받는 것으로 생각하는 것이 안전측이지만, 앵커체가 깊은 곳에 있을 때에도 지표면까지 영향원추가 확장된다고 본다면, 극한인발력이 과소평가되어 상당히 비경제적인 설계가 될 것이다.

위에서 기술한 바와 같이 지표면이 수평인 연직앵커의 군효과에 대해서도 아직까지 설계에 적용할 수 있는 신뢰할만한 지침은 마련되어 있지 않다. 더구나 본 연구와 같이 굴착면 내부에 설치된 경사앵커의 군효과에 관한 연구는 국내외적으로 거의 없는 실정이다. 따라서 이에 대한 연구는 대단히 중요하고 시급하다고 할 수 있다.

3. 실내모형실험

3.1 실험 장치 및 방법

실험장치의 개요는 그림 3과 같으며, 실험은 단앵커(single anchor)의 경우와 군앵커(중심간격이 20cm 및 40cm, 그림4 참조)의 경우에 대해 실시했다. 이때 측면 앵커체를 포함해서 TYPE A는 5개, TYPE B는 3개의 앵커체를 설치해서, 그림 3의 군앵커 연결보로써 연결된 각 앵커체를 동시에 인발했다. 토조의 측면면에는 앵커의 인발중의 주변지반의 변형 측정 및 가능한 한 측면면과 지반의 마찰을 제거하기 위해서 라텍스멤브레인(0.2mm 두께)을 지반변형관찰 영역에 그리이스(0.1mm 두께)를 도포하여 붙였다.

앵커의 인발은 보다 정밀한 계측을 위해 약

0.1mm/min의 완속으로 변위제어로 행하고, 인발력은 측면면 마찰의 영향을 받지 않도록 중앙앵커에 대한 값을 사용했다.

깊은 지반에 타설된 앵커를 근사 시키기 위해서 지표면에 I형강을 다수 깔고 그 위에 모래상자를 올려서 상재압을 가했으며, 상재압의 크기는 $q=0.122\text{kgf/cm}^2$ 이다.

앵커체는 PVC파이프로 제작했는데, 앵커체 표면에는 접착제를 도포해서 모래입자를 부착시켜 실제의 앵커체 표면과 비슷하게 충분히 거칠게 했다. 여기서 충분히 거칠다는 것은 '그 이상 거칠게(입경을 크게)해도 마찰각이 증대하지 않는다' 또는 '앵커체 표면과 지반 사이에는 미끄러짐이 없이 전단변형이 발생한다'는 의미²⁰⁾이다.

또, 앵커체는 길이 방향으로 사진 1과 같이 절반으로 잘라서, 내부에 변형률계이지를 앵커체의 길이 방향으로 5cm 간격으로 10매를 부착하고 나머지 반쪽을 접착했다. 변형률계이지를 통해 앵커의 인발에 따른 앵커체 표면의 마찰응력을 계산해서, 이것으로 군효과에 의한 마찰응력의 변화를 분석하므로써 군효과가 극한인발력에 미치는 영향을 구했다. 변형률계이는 KYOWA社의 KFC-1-C1-11로서 저항치가 $119.8 \pm 0.2\Omega$, 게이지율이 $2.15 \pm 1\%$ 이다. 또한 이 게이지는 온도보상형(SELCOM TYPE)이므로 온도 변화에 따른 게이지 자체의 출력 오차는 극히 작아서 무시될 수 있다.

게이지 회로는 휘트스톤 브리지 회로에서의 1게이지법을 사용했는데, 리드선의 온도 보정을 위해 3선 결선방식을 채택했다. 본 실험에 사용된 데이터집록기(Data Logger)는 KYOWA社의 UCAM-10A로서, 내장된 게이지율이 2.0이므로 사용 게이지의 게이지율이 2.0이 아닐 때는 출력된 변형률을 식 (1)로써 보정해야 한다. 본 실험에 사용된 게이지의 게이지율은 2.15이다.

$$\text{진변형률} = \frac{2.0}{\text{사용게이지의게이지율}(2.15)} \times \text{변형률} \quad (1)$$

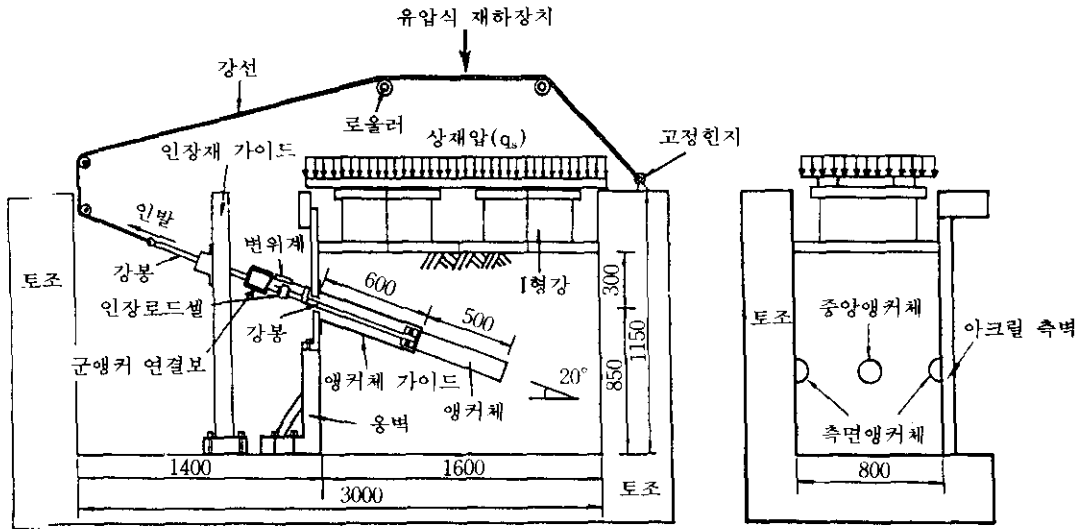


그림 3. 경사 앵커의 인발실험 장치도, 단위 : mm

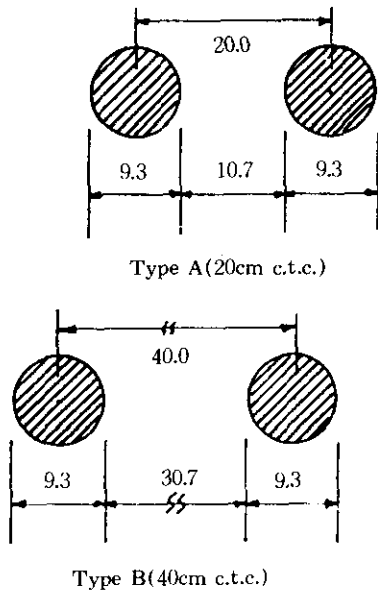


그림 4. 두종류의 군앵커 간격, 단위 : cm



사진 1. 변형률게이지의 리드선을 연결한 시험 앵커체

또한, 3선결선방식에서의 리드선이 길 경우, 리드선의 저항에 의하여 게이지율이 변화되므로 식 (2)로써 보정할 필요가 있다.

$$\text{진변형률}_2 = \left(1 + \frac{\text{리드선저항치}}{\text{게이지저항치}}\right) \times \text{진변형률}_1 \quad (2)$$

3.2 앵커체의 검정

앵커체의 작용 하중과 앵커체의 각 위치에서의 변형률 사이의 관계를 검정해서 실험시 구해지는 변형률로써 각 단면에서의 작용 하중을

구하게 된다. 그림 5는 변형률계이지 한 개에 대한 작용 하중과 변형률의 관계 예를 나타낸다. 이 그림에서, 앵커체가 비교적 선형 거동을 하고 있다는 것을 알 수 있다.

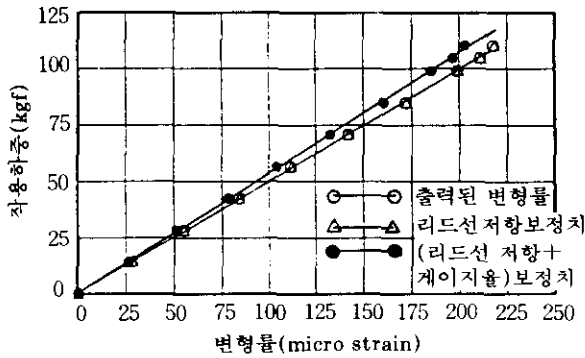


그림 5. 앵커체의 작용 하중과 변형률과의 관계

3.3 모형지반

지반은 #10(2.0mm)체를 통과한 공기 건조 상태의 구포사(입도분포는 그림 6 참조)를 사용해서 空中落下法(또는 降砂法, raining method or air pluviation method)에 의해서 균

질하게 제작했다(평균 건조단위중량=1.52gf/cm³). 지반은 다중체를 이용하여 모래의 낙하 높이를 1m 유지하도록 해서 뿌려서 제작했으나, 앵커체 설치후 모래를 낙하시켰으므로 이 방법으로는 앵커체와 가이드의 밑부분은 다른 부분과 같은 밀도의 지반을 제작할 수 없다. 따라서 이 부분은 연직방향으로 완만하게 구부러진 호스 속으로 모래가 미끄러져 내리도록 하여 지반을 제작하여 비슷한 밀도를 갖도록 했다(사전 검정에 의해 호스의 낙하 길이는 1.2m 정도로 했다). 林 등²¹⁾에 의하면 앵커체 표면의 최대마찰각은 평면변형률 요소시험(평면변형률 압축시험, 단순전단시험, 비틀단순전단시험, 직접전단시험 등)에 의한 무신축방향(zero-extension direction)의 면상의 전단저항각의 최대치와 일치한다고 한다. 본 실험에서는, 앵커체 표면의 최대마찰각을 알기 위해서 직접전단시험을 실시했는데, 모형지반과 동일한 밀도에서의 전단저항각 $\phi_{ds} = 38.8^\circ$ 이었다. Jewell 등^{22), 23)}의 식($\tan \phi_{ds} \cong \tan \phi_{psc} / 1.2$)에 의하면 이 모래의 평면변형률 압축시험에서의 내부마찰각은 $\phi_{psc} \cong 44.0^\circ$ 로 비교적 조밀한 상태에 있다.

Grain size analysis of Guposand

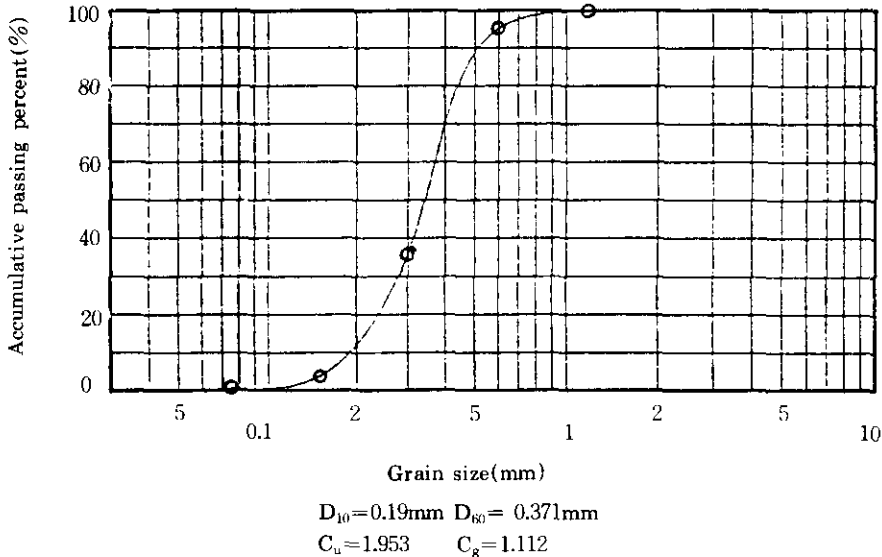


그림 6. 구포사의 입도곡선

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 앵커 변위에 따른 인발력

그림 7은 단앵커 및 A형 군앵커(중심 간격 20cm, 앵커체 표면 간격 10.7cm), B형 군앵커(중심 간격 40cm, 앵커체 표면 간격 30.7cm)의 인발에 따른 인발력의 변화를 나타낸다. 이 그림에서, 극한인발력의 크기는 A형 군앵커 > 단앵커 > B형 군앵커 순이지만, 약간의 지반 밀도의 차이가 발생할 수 있는 점을 생각하면 거의 동일한 것을 알 수 있다. 그러나 동일한 방법으로 모형지반을 제작했으므로 지반의 밀도는 각 실험마다 큰 차이는 없는 것으로 생각된다. 어쨌든 실험 결과 앵커체 표면 간격이 10.7cm로 대단히 가까운 경우라도 군효과에 의한 인발력의 감소는 보이지 않는다. 이 현상은 말뚝의 경우를 보더라도 일반적인 통념과는 거리가 있어 앞으로 보다 많은 실험을 통해 이론적으로 확립해야 할 것이다.

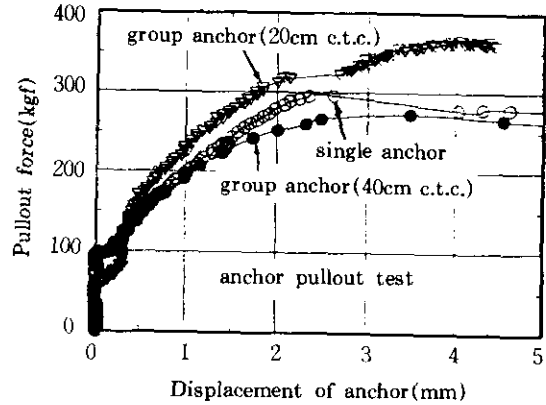


그림 7. 앵커의 인발에 따른 인발력의 변화

4.2 앵커체 주변마찰응력

앵커의 인발 변위(δ)에 따른 앵커체의 각 지점에서 측정된 인장변형률은 그림 8과 같다. 본래 계측은 10개의 게이지를 사용해서 실시했으나, 2개가 불량해서 제외시켰다. 앵커체의

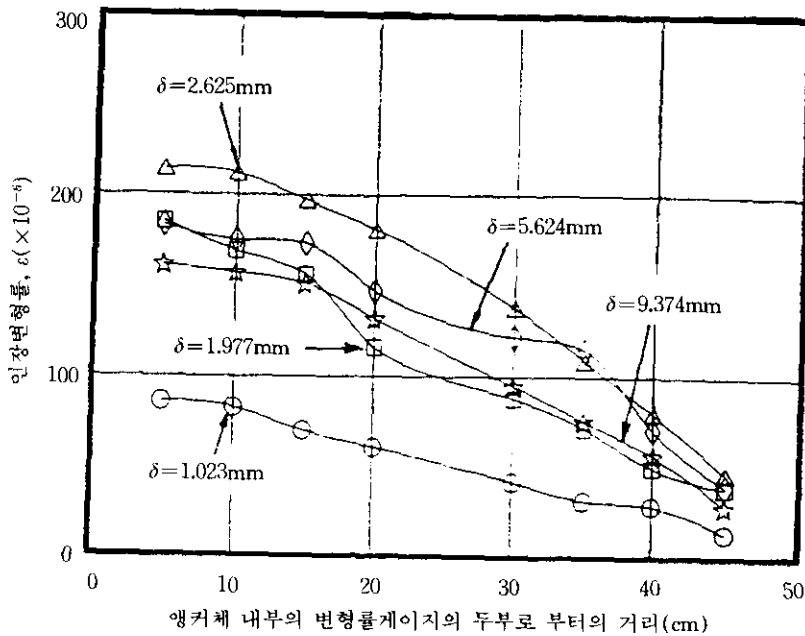


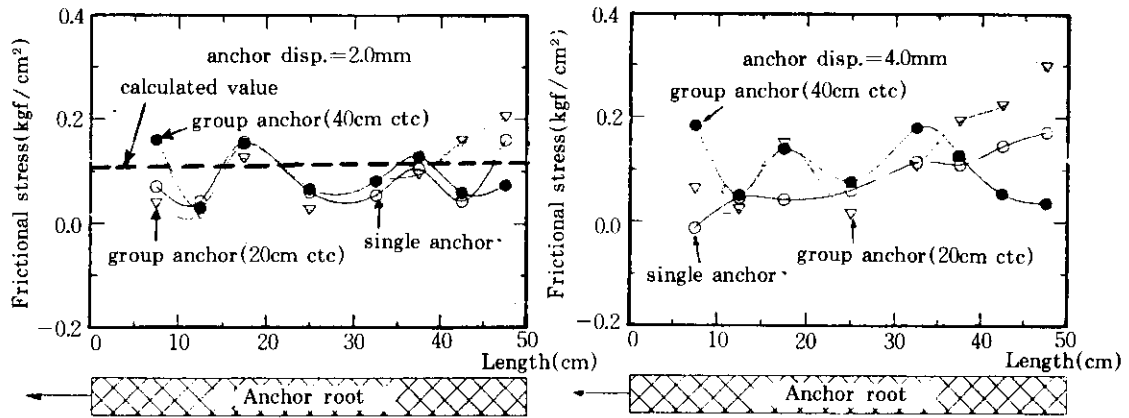
그림 8. 앵커체 각 측정에서의 변형률

각 지점에서 측정된 인장변형률로써 3.2항의 검정 방법을 사용하여 각 단면에서 구한 인발력으로 식 (3)을 이용하여 각 구간의 평균 주면마찰응력을 구했다.

$$\tau_i = \frac{T_i - T_{i+1}}{\pi D l_i} \quad (3)$$

여기서, T_i : 각 단면에서의 인발력
 D : 앵커체 직경(9.3cm)
 l_i : 각 구간의 길이

그림 9는 위에서 기술한 방법으로 구한 앵커체 표면의 주면마찰응력을 나타낸다. 이 그림에서, 앵커의 인발 변위 $\delta=2.0\text{mm}$ (극한인발력 부근)일 때는 세 경우가 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. $\delta=4.0\text{mm}$ 일 때는, 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 20cm 간격의 균앵커를 제외하면 극한인발력을 넘어서 인발력이 감소되기 시작하므로 각 경우에서 차이가 보인다.



(가) 앵커변위 $\delta=2.0\text{mm}$ 인 경우

(나) 앵커변위 $\delta=4.0\text{mm}$ 인 경우

그림 9. 단앵커 및 균앵커(두 종류)의 각 인발 변위에서의 앵커체 표면의 주면마찰응력

4.3 앵커의 인발에 따른 주변지반의 거동

앵커의 인발에 따른 주변지반의 거동은 3.1항에서 기술한 바와 같이 토조의 측벽에 부착된 멤브레인 위에 그려진 격자점의 움직임을 사진법¹⁾을 이용해서 분석하므로써 관찰했다.

그림 10은 멤브레인에 설정된 초기 지반요소이다(사진 2 참조). 실험 장치 측벽의 휨 방지용 뱀에 가려진 부분이 많아 앵커체 전체에 대한 주변 지반을 관찰하지 못한 것이 아쉬운 점이다.

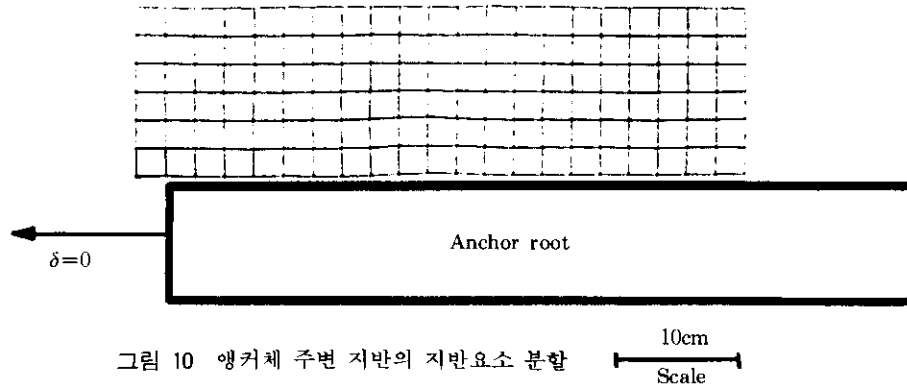


그림 10 앵커체 주변 지반의 지반요소 분할



사진 2. 그림 10에 대한 본래 사진

그림 11은 앵커체 변위 $\delta=2\text{mm}$ (극한인발력 부근, 그림 7 참조)일 때의 주변 지반의 변위를 나타낸다. 이 그림에서 변위의 크기는 대단히 크게 확대된 것으로서 실제 크기는 0.1mm 이하로 대단히 작다. 그림 12는 주변 지반의 주변형률증분(major principal strain increment)의 방향을, 그림 13은 무신축 방향(zero-extension direction)을 나타낸다. 주변형률증분의 방향은 이방성을 고려할 때의 중요한 정보가 되고, 무신축방향은 파괴면의 방향을 하는데 중요한 역할을 한다. 이 그림들에서 알 수 있는 바와 같이, 주변 지반 변형률의 크기가 1% 이내로 대단히 작아서 파괴면은 분명히 앵

커체 표면에서 발생한 것을 알 수 있다.

그런데, 그림 11에서 알 수 있는 바와 같이, 변위는 대단히 작지만, 그 방향의 경향은 비교적 명확한 것을 알 수 있다. 즉, 앵커 두부 쪽이 약간 더 큰 변위가 발생했고, 또한 전체적으로 하향 변위라는 것을 알 수 있다. 이 현상은 아직 일반적인 현장 앵커의 해석에 그대로 적용하기에는 무리가 있겠지만, 인발에 의해 앵커체의 길이 방향 인장이 발생해서 이 영향으로 앵커체의 직경이 감소되어 발생된 것이라고 추정된다. 이에 대한 것은 앵커체의 종류(특히, 강성 등에 따른)나 길이, 상재하중, 앵커체의 매설 깊이 등 많은 요인들에 따라 달라질 수 있으므로 앞으로 이것들에 대한 많은 실험과 연구가 뒤따라야 현장 적용에 대한 명확한 이론적 방법이 나올 것으로 생각한다.

5. 단앵커의 주면마찰응력 간략 산정법 제안

앵커를 인발하면, 앵커체 표면에 마찰력이 작용하여, 앵커체 표면 부근의 지반 요소에 작용하는 연직응력은 최대주응력이 되지 않는다. 이러한 점을 고려해야 精度 높은 계산법이 제안될 수 있다. 그러나, 아직 이에 대한 충분한 연구가 진행되지 않았으므로 여기서는 연직 및 수평응력이 최초 정지상태를 그대로 유지

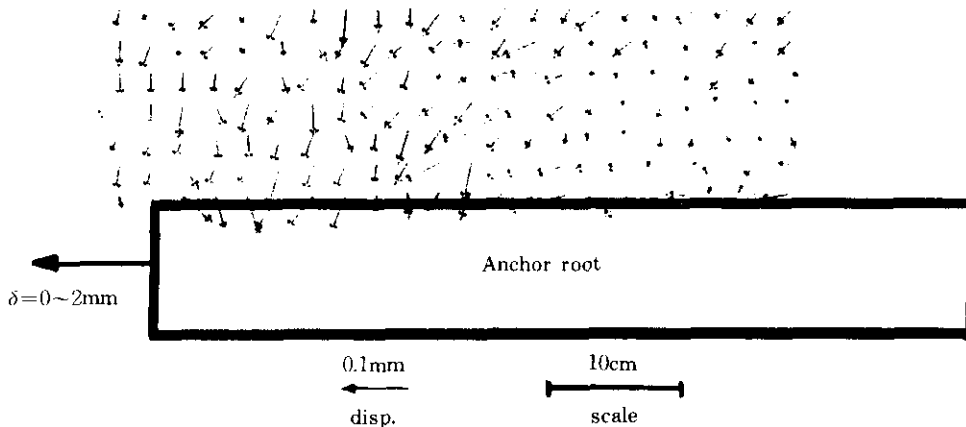


그림 11. 앵커의 인발 변위 $\delta=2\text{mm}$ 일 때의 주변지반의 변위

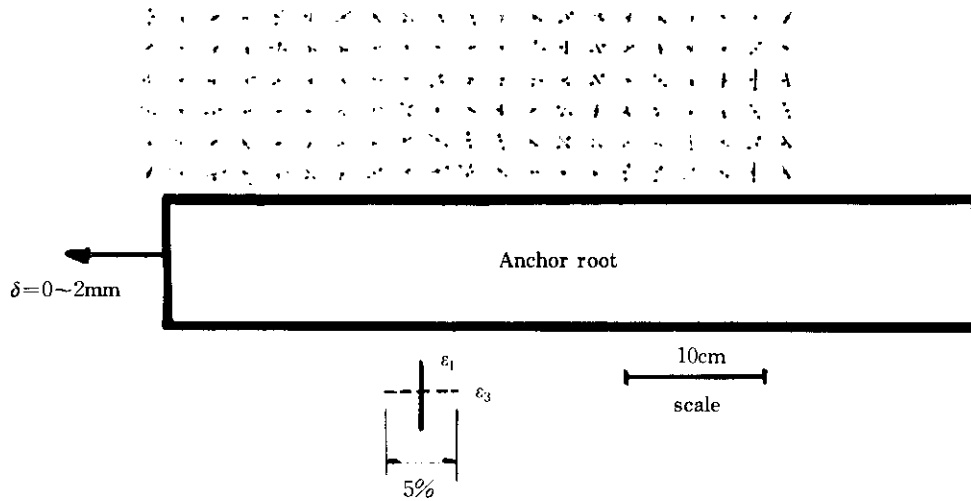


그림 12. 앵커의 인발 변위 $\delta=2\text{mm}$ 일 때의 주변지반의 주변형률증분

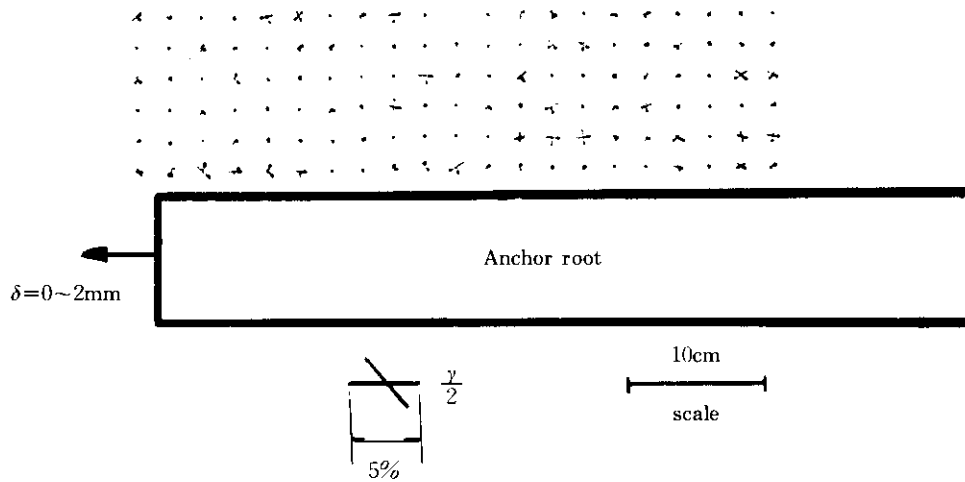


그림 13. 앵커의 인발 변위 $\delta=2\text{mm}$ 일 때의 주변지반의 무신축방향

해서 앵커의 인발 중에도 주응력을 유지한다고 가정해서 간략 산정식을 제안했다.

그림 14에서,

A_1 지점의 연직응력 :

$$\sigma_{A1} = 0.122\text{kgf/cm}^2 + 1.52 \times 10^{-3}\text{kgf/cm}^3 \times 45.87\text{cm} = 0.192\text{kgf/cm}^2$$

A_2 지점의 연직응력 :

$$\sigma_{A2} = 0.122\text{kgf/cm}^2 + 1.52 \times 10^{-3}\text{kgf/cm}^3$$

$$\times 55.17\text{cm} = 0.206\text{kgf/cm}^2$$

B_1 지점의 연직응력 :

$$\sigma_{B1} = 0.122\text{kgf/cm}^2 + 1.52 \times 10^{-3}\text{kgf/cm}^3 \times 62.97\text{cm} = 0.218\text{kgf/cm}^2$$

B_2 지점의 연직응력 :

$$\sigma_{B2} = 0.122\text{kgf/cm}^2 + 1.52 \times 10^{-3}\text{kgf/cm}^3 \times 72.27\text{cm} = 0.232\text{kgf/cm}^2$$

σ_{A2} , σ_{B2} 를 각각 A, B지점의 최대주응력(σ_{1A} ,

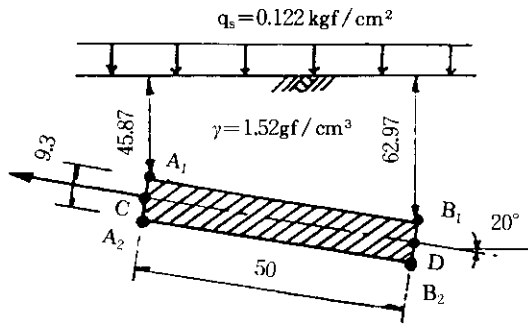


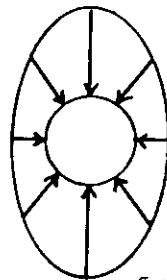
그림 14. 앵커체의 매설 위치, 단위 : cm

σ_{1B})이라고 하면, 최소주응력은 각각 다음과 같다. 즉, $\sigma_{3A} = K \cdot \sigma_{1A}$, $\sigma_{3B} = K \cdot \sigma_{1B}$ 가 된다. K는 토압 계수로서 정지토압계수 K_0 라고 가정하고 Jaky 식을 이용하여 구하면 $K_0 = 1 - \sin\phi = 1 - \sin 38.8^\circ = 0.373$ 이다. 여기서 Jaky식의 ϕ 는 삼축압축 시험(평면변형률시험이 아님)에 의한 유효응력 내부마찰각이다. 그런데 평면변형률 압축시험에 의한 내부마찰각(ϕ_{psc}), 평면변형률 압축시험에서의 무신축방향(zero-extension direction)의 면위에서의 전단저항각(ϕ_{ZE}), 직접전단시험에 의한 파괴면 위의 전단저항각(ϕ_{ds}) 및 삼축압축시험에 의한 내부마찰각(ϕ_{tc})의 관계는 일반적으로 식 (4)와 같은 관계를 갖는다.

$$\phi_{psc} > \phi_{ZE} = \phi_{ds} \approx \phi_{tc} \quad (4)$$

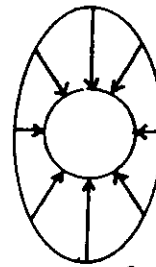
(이론 및 실험적 관계)(실험적 관계)

$$\sigma_{nA1} = 0.178 \text{ kgf/cm}^2$$



(가) AC 단면

$$\sigma_{nB1} = 0.202 \text{ kgf/cm}^2$$



(나) BD 단면

그림 15. 앵커체 각 단면에서의 수직응력 분포

본 실험에서는 $\phi_{ds} = 38.8^\circ$ 이므로, K_0 의 계산시 ϕ_{tc} 의 근사값으로 38.8° 를 사용하기로 한다.

$$\sigma_{3A1} = 0.373 \times 0.192 \text{ kgf/cm}^2 = 0.072 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{3A2} = 0.373 \times 0.206 \text{ kgf/cm}^2 = 0.077 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\therefore \sigma_{3B1} = 0.373 \times 0.218 \text{ kgf/cm}^2 = 0.081 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{3B2} = 0.373 \times 0.232 \text{ kgf/cm}^2 = 0.087 \text{ kgf/cm}^2$$

또 A, B지점에서의 앵커체 표면의 수직응력 σ_{nA} , σ_{nB} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{nA1} &= \frac{\sigma_{1A1} + \sigma_{3A1}}{2} + \frac{\sigma_{1A1} - \sigma_{3A1}}{2} \cos(2 \times 20^\circ) \\ &= 0.178 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{nA2} &= \frac{\sigma_{1A2} + \sigma_{3A2}}{2} + \frac{\sigma_{1A2} - \sigma_{3A2}}{2} \cos(2 \times 20^\circ) \\ &= 0.191 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{nB1} &= \frac{\sigma_{1B1} + \sigma_{3B1}}{2} + \frac{\sigma_{1B1} - \sigma_{3B1}}{2} \cos(2 \times 20^\circ) \\ &= 0.202 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{nB2} &= \frac{\sigma_{1B2} + \sigma_{3B2}}{2} + \frac{\sigma_{1B2} - \sigma_{3B2}}{2} \cos(2 \times 20^\circ) \\ &= 0.215 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

C, D지점의 수직응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{nC} &= (0.122 \text{ kgf/cm}^2 + 1.52 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3 \\ &\quad \times 50.52 \text{ cm}) \times K_0 = 0.074 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{nD} &= (0.122 \text{ kgf/cm}^2 + 1.52 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3 \\ &\quad \times 67.62 \text{ cm}) \times K_0 = 0.084 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}$$

AC단면 및 BD단면에서의 수직응력 분포는 그림 15와 같다.

그림 15에서 알 수 있는 바와 같이, 앵커체 표면에 작용하는 수직응력의 분포는 상하로 분리된 반타원형이므로, 앵커체 원주의 평균 수직응력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{AC} = \frac{\pi}{4} \left\{ \frac{(9.3+0.074 \times 2)(9.3+0.178 \times 2) - 9.3^2}{2} + \frac{(9.3+0.074 \times 2)(9.3+0.191 \times 2) - 9.3^2}{2} \right\} / (\pi \times 9.3) = 0.131 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{BD} = \frac{\pi}{4} \left\{ \frac{(9.3+0.084 \times 2)(9.3+0.202 \times 2) - 9.3^2}{2} + \frac{(9.3+0.084 \times 2)(9.3+0.215 \times 2) - 9.3^2}{2} \right\} / (\pi \times 9.3) = 0.147 \text{ kgf/cm}^2$$

∴ AC 및 BD 단면에서의 평균주면마찰응력은 다음과 같다.

$$\tau_{AC} = \sigma_{AC} \times \tan \mu$$

$$\tau_{BD} = \sigma_{BD} \times \tan \mu$$

∴ AC 및 BD 단면에서의 평균주면 마찰응력은 다음과 같다.

여기서, μ 는 앵커체 표면의 마찰각으로, 앵커체 표면에서 剪斷面이 발생할 때는 표면 방향이 무신축 방향(zero-extension direction)이 되므로³⁾, $\mu = \phi_m$ 이다. 식 (4)의 관계에서 시험치인 $\phi_m = 38.8^\circ$ 를 ϕ_m 로 사용하기로 한다.

$$\therefore \tau_w = 0.131 \text{ kgf/cm}^2 \times \tan 38.8^\circ = 0.105 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\tau_w = 0.147 \text{ kgf/cm}^2 \times \tan 38.8^\circ = 0.118 \text{ kgf/cm}^2$$

이 값은 그림 9(가)에 두꺼운 점선으로 나타내어져 있는데, 실측치의 평균값과 비교하면 표1과 같다.

Table 1. Wave Velocities at Various Calculation Stages

Layer		Inversion Calculation Stage		
No.	Depth (ft)	Straight Ray Path	Refracted Ray Path	
			1st Iteration	Final Iteration
1	0~3	365 fps	322 fps	323 fps
2	3~9	4856 fps	1987 fps	1870 fps
3	9~16	1471 fps	4775 fps	4737 fps
4	16~25	6335 fps	3748 fps	4737 fps

fps = ft/sec

6. 결론

본 연구는, 공기 건조 모래지반내의 경사 지

반앵커의 군효과에 대한 초기 단계적인 실험적 연구로서 본 모형실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 극한인발력 발생시의 앵커체의 주변마찰응력은 단앵커, 군앵커의 경우가 모두 길이 방향으로 별 차이가 없었다.

(2) 앵커의 인발에 따른 주변지반의 최종 파괴면이 앵커체 표면에서 발생할 때는 앵커체 중심 간격이 40cm(앵커체 표면 간격=30.7cm)인 경우는 물론 앵커체 중심 간격이 20cm(앵커체 표면 간격=10.7cm)인 대단히 가까운 경우라도 단앵커의 경우와 주변마찰응력(극한인발력 발생시)이 거의 동일한 것으로 나타났다. 즉, 군효과가 보이지 않았다.

(3) 단앵커의 극한인발력 개략산정법을 제안했는데, 앵커체 주변마찰응력은 평균 실측치보다 20% 정도 크게 계산되었다. 이는 측압계 수를 정지도압계수로 가정한데서 오는 오차가 큰 부분을 차지할 것으로 생각되며 앞으로, 보다 많은 실험과 보다 정밀한 해석을 통해서 精度 높은 산정법을 개발해야 할 것이다.

(4) 본 실험의 경우, 앵커의 인발에 따른 최종적인 파괴면은 앵커체 표면에서 발생했으며, 주변 지반의 변위는 대단히 작지만, 앵커체의 방향으로 하향하는 경향을 보였다. 이는 앵커 인발에 따른 앵커체 직경의 감소로 인한 것으로 추정된다.

(5) 앞으로 상재압의 크기(또는 매설 깊이), 앵커체의 강성, 지반의 종류(또는 밀도), 앵커체의 크기, 지하수위, 앵커체의 타설 각도 등에 따른 군효과의 영향에 대해 실내 및 원위치 실험을 통해서 지속적으로 연구하여 실제 설계에 적용할 수 있는 신뢰성 있는 설계법을 개발해야 할 것이다.

감사의 말씀

이 논문은 1992년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공보과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 부족하기 그지없는 사람에

게 연구의 기회를 부여해 주신 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다. 실험장치 제작등 많은 분들의 노고에 감사드리며, 앞으로 보다 깊이 있는 연구를 통해 보답드릴 것을 다짐해 봅니다.

참 고 문 헌

1. 林 鍾鐵, 朴 性栽, 朱 仁坤, 朴 鏞富, 金 永仁 (1992. 3), "平面變形率 狀態에 있는 模型地盤의 變形解析法", 韓國地盤工學會志 第8卷 第1號, pp.29~39.
2. 日本土質工學會(1990. 2), グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, pp.78~81.
3. 임 중철(1991. 2), 제3회 지반공학강습회, 굴착 및 흙막이공법 제5장 앵커, 한국지반공학회.
4. 日本グラウンドアンカー技術協會(1986. 1), グラウンドアンカー工法, 森北出版株式會社, pp.46~53.
5. Xanthakos, P.P. (1991), Ground anchors and anchored structures, A Wiley-interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., pp.214~218.
6. 林 鍾鐵, 龍岡 文夫(1989. 10), "砂地盤内の 平面變形率 鉛直앵커의 模型實驗" 大韓土木學會 1989年度 學術發表會 概要集, pp.460~463.
7. 朱 仁坤(1991. 2), "補強土工法에 의한 擁壁의 土壓輕減效果," 釜山大學校 工學碩士 學位論文.
8. 朴 鏞富(1991. 2), "擁壁에 작용하는 土壓과 壁面 摩擦角에 대한 實驗的 研究," 釜山大學校 工學碩士 學位論文.
9. 林 鍾鐵, 龍岡 文夫, 宮崎 啓一(1990. 5), "砂地盤内の剛な鉛直アンカーの引抜き抵抗メカニズム," 土と基礎, Vol. 38, No.5, pp.33~38.
10. 林 鍾鐵(1989. 3), "砂地盤内のグラウンドアンカーの引抜き抵抗メカニズムに関する研究," 日本東京大學博士學位論文.
11. 林 鍾鐵, 龍岡 文夫, 朴 性栽(1990. 3), "平面變形率 狀態에 있는 鉛直地盤앵커의 破壞モード," 大韓土質工學會志 第6卷, 第1號, pp.43~56.
12. 朴 鍾鐵(1991. 12), "強度 異方性を 고려한 模型地盤의 應力解析法," 釜山大學校 工科大學論文集 第42輯, pp.87~96.
13. Hobst, L. and Zajic, J.(1983), "Anchoring in rock and soil," Developments in Geotechnical Engineering, Vol.33, Elsevier Science Publ., Amsterdam, pp.75.
20. Uesugi, M. and Kishida, H.(1986. 12), "Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel," Soils and Foundations, Vol. 26, No.4, pp.139~149.
21. 林 鍾鐵, 宮崎 啓一, 龍岡 文夫(1989. 6), "砂地盤内の鉛直アンカー表面の應力狀態," 第24回日本土質工學研究發表會, pp.1495~1498.
22. Jewell, R.A. and Wroth, C.P.(1985), "Direct shear tests on reinforced sand," Geotechnique Vol. 37, No.1, pp.53~68.
23. Tatsuoka, F.(1985. 12) "On the angle of interface friction for cohesionless soils," Soils and Foundations, Vol. 25, No.4, pp.134~141.

(접수일자 1994. 7. 15.)