

모래지반내의 연직 지반앵커 표면의 마찰각

Friction Angle on the Surface of Vertical Ground Anchor in Sand

임 종 철*

Im, Jong-Chul

Abstract

In this study, friction angles on the surface of vertical rigid ground anchor in normally consolidated dry sand were measured by model pullout tests in laboratory. Friction angles were obtained from the normal and shear stresses measured along depth of the anchor surface by attaching several 2-dimensional load cells.

Model tests were conducted under the plane strain state and axial symmetric state. From the results of tests, it was concluded that the maximum friction angle on the anchor surface coincides nearly with the maximum angle of stress obliquity on the plane of zero-extension direction obtained by plane strain compression test. This result was made with regard to the strength anisotropy and stress dependency of sand. It showed that when angle of shear resistance of the sand is applied to the friction angle of the anchor surface, the design capacity could be less than the applied force, thus making the anchor unsafe.

요 지

본 연구에서는 정규압밀 건조 모래 지반내의 연직 강체 지반앵커에 대한 모형 인발실험을 실시해서 앵커 표면의 마찰각을 실측했다. 마찰각은 앵커 표면의 깊이 방향으로 설치된 다수의 2방향 로드셀을 사용해서 측정된 수직응력, 전단응력으로 구했다.

실험은 평면변형률 앵커와 축대칭 앵커에 대해서 실시했는데 실험 분석 결과, 앵커표면의 최대마찰각은 평면변형률 압축시험에 의한 무신축방향의 면 상의 응력경각의 최대치와 거의 일치한다는 것을 알았다. 이 결론은 모래의 강도 이방성과 구속압 의존성 등을 고려하여 얻은 것으로, 앵커 표면 마찰각에 모래의 전단저항각을 적용해서 설계하면 위험측이 된다는 것도 알 수 있다.

*정희원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 조교수

1. 서 론

林등⁹⁾에 의하면 정규압밀이나 약간 과압밀된 모래지반 내의 연직 지반앵커의 파괴면은 앵커 주변지반이 아닌 앵커 표면에서 발생한다. 파괴면이 앵커 표면에서 발생할 경우에 앵커의 극한인발력을 구하기 위해서는 앵커 표면에 작용하는 수직응력과 마찰각을 알아야 한다. 현장 앵커의 표면은 충분히 거친 것으로 보고, 여기서도 앵커 표면이 충분히 거친 경우일 때에 대한 것으로 한정한다. 충분히 거칠다는 것은, 그 이상 거칠게 해도 최대마찰각이 증가하지 않는 때의 거칠기를 말한다. Uesugi 등¹⁰⁾에 의하면, 일본 豊浦標準砂와 鋼材 표면의 마찰각에 대해 실험한 결과, 충분히 거친 鋼材 표면의 거칠기는 약 $30\mu\text{m}$ 이다.

지금까지 마찰각 $\mu_{\text{max}} (= \arctan(\tau/\sigma_n))$ 를 구하기 위해서, 앵커 표면에서의 수직응력(σ_n), 전단응력(τ)을 직접 측정하는 예는 별로 없다. 그런데, Wernick¹¹⁾는 모래지반내의 연직앵커의 실내모형실험을 행해서, 앵커표면에서 직접 측정된 수직응력, 전단응력을 사용해서 최대마찰각을 구했다. 그 결과, 앵커표면의 최대마찰각은, 自作한 "True direct shear test apparatus(이것은 전단시 상부 전단상자의 회전을 방지한 개량형 직접전단시험기이다)"로부터 얻은, 전단면상의 응력경각의 최대치와 일치한다고 하고 있다. 그러나, 이 양자의 실험에서는, σ_1 방향~퇴적면이 이루는 각도(ω , 즉 모래의 강도의 이방성)와 구속압(σ_3)의 영향에 대해서는 고려하고 있지 않는 것에 주의할 필요가 있다. 모래의 종류에 따라 정도의 차이는 있지만, 일반적으로 모래지반의 강도는 구속압의 영향과 이방성이 꽤 있다. Tatsuoka 등¹²⁾에 의하면 일본 豊浦標準砂의 평면변형률 압축시험의 결과, ω 에 의한 내부마찰각의 차는 최대 5° 이상인 것을 알 수 있다. 따라서, 위에서 기술한 바와 같은 데이터의 일치에 대해서는 검토의 여지가 있다. 또, 앵커 표면 방향과 인접 지반요소의 특성방향(최대응력경각면의 방향 또

는 zero-extension 방향)에 대한 고찰도 없다.

본 연구에서는, 평면변형률 앵커와 축대칭 앵커의 실내모형실험을 행해서, 앵커 표면의 수직응력, 전단응력을 앵커 깊이 방향으로 측정했다. 이들 실측치를 이용해서, 조밀($D_r > 83\%$)한 정규압밀 모래 지반내에 타설된 강체 앵커 표면의 마찰각을 구했으며, 또 이들 실측치를 분석해서 앵커 표면에 인접한 지반요소의 전단저항각을 이용해서 표면 마찰각을 구하는 방법에 대해서도 고찰했다.

2. 실내 모형실험

2.1 평면변형률 앵커

평면변형률 앵커의 인발실험장치의 개요는 그림 1과 같다. 토조의 측면면에는 앵커의 인발중의 주변 지반의 변형을 관찰하기 위해서와, 가능한 한 측면면과 지반의 마찰을 제거하기 위해서 고무 멤브레인(0.2mm 두께)을 $60\text{cm} \times 50\text{cm}$ 의 범위에 그리이스층(0.1mm 두께) 위에 붙였다. 지반은 공기전조 상태의 豊浦砂(Toyoura sand)를 사용해서 슬롯 방식의 모래뿌리기로써 공중낙하법에 의해 제작되었다. 앵커의 표면에는 샌드페이퍼 #80을 붙여서 실제의 앵커와 같이 충분히 거칠게 했다. 재하는 약 $0.1\text{mm}/\text{min}$ 의 속도로서 변위제어로 행했고, 하중은 측면면 마찰의 영향을 받지 않도록 중앙 1/3의 앵커에 대한 값을 사용했으며 깊이 방향으로 설치된 8개의 2방향 로드셀을 이용해서 앵커 표면에 작용하는 수직응력, 전단응력을 측정했다. 여기서 사용된 2방향 로드셀은 평행평판 모드를 이용한 구조로서, 수직 및 전단력의 상호 간섭이 무시할 수 있을 정도로 작고, 실제 하중내에서의 선형성이 좋은 장점을 갖고 있다.

앵커의 인발실험은 원위치와 같은 깊은 지반중의 앵커로써 행하는 것이 바람직 하나, 실내에서 그와 같은 대형 실험을 행하는 데는 어려움이 많다. 따라서 여기서는 지표면에 상재압

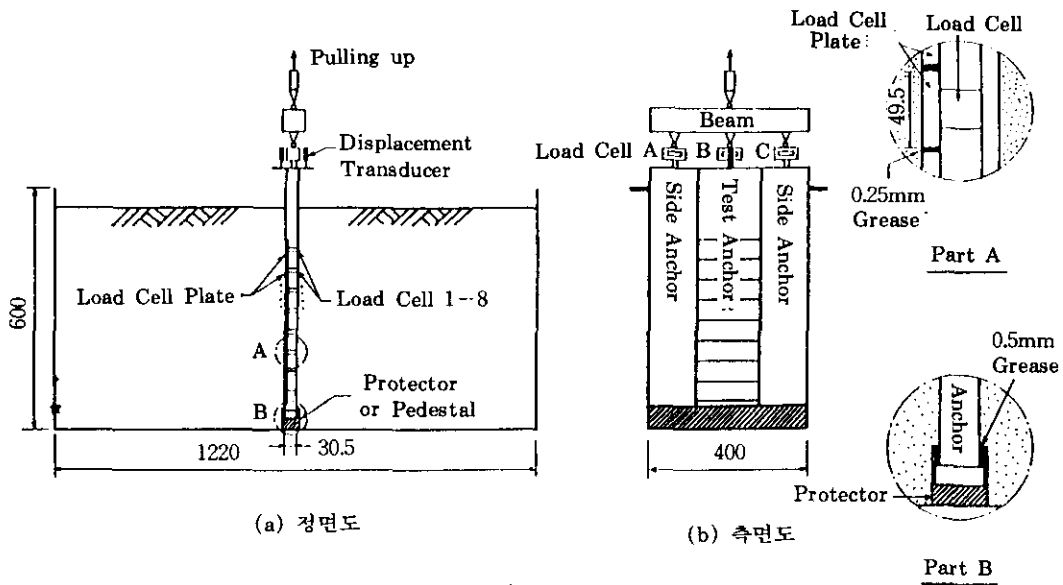


그림 1. 평면변형률 앵커의 모형실험 장치, 단위 : mm

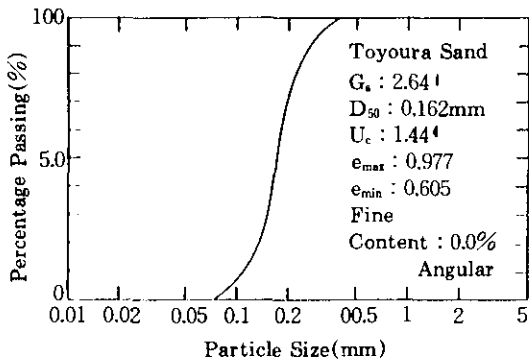


그림 2. 모형지반 제작용 모래의 입도곡선과 물리적 성질

을 가해서 깊은 지반에서의 토피압을 근사시켰다. 상재압은 지표면에 놓인 10개의 분할 재하판(398×116.5×20mm) 위에 20개의 기압식 가압시린더를 설치해서 재하판을 아래로 누름으로써 가했다.

모형지반 제작에 사용된 모래의 입도곡선과

물리적 성질은 그림 2와 같다.

2.2 축대칭 앵커

축대칭 앵커의 인발실험 장치는 그림 3과 같다. 모형토주는 축압을 수압으로 가할 수 있고 토주 뚜껑과 지표면 사이에 고무 튜브를 넣어 공기압으로 상재압을 가할 수 있도록 되어 있다. 앵커는 외경이 101mm인 원통형으로 되어 있는데, 표면은 평면변형률 앵커의 경우와 동일한 거칠기의 샌드페이퍼 #80을 붙여서 충분히 거칠게 했다. 앵커 깊이 방향으로 50mm 간격으로 9개의 2방향 로드셀을 설치해서 앵커의 인발에 따른 앵커 표면의 수직응력, 전단응력의 변화를 측정했다. 이때, 인접하는 로드셀 판 사이의 간섭을 없애기 위해서, 0.5mm의 틈에 그리스를 얇게 채웠다.

모형지반에 사용된 모래는 평면변형률 앵커의 경우와 동일하며(그림 2참조), 모형 지반은 다중체 방식의 모래뿌리기로써 공중낙하법으로 제작되었다.

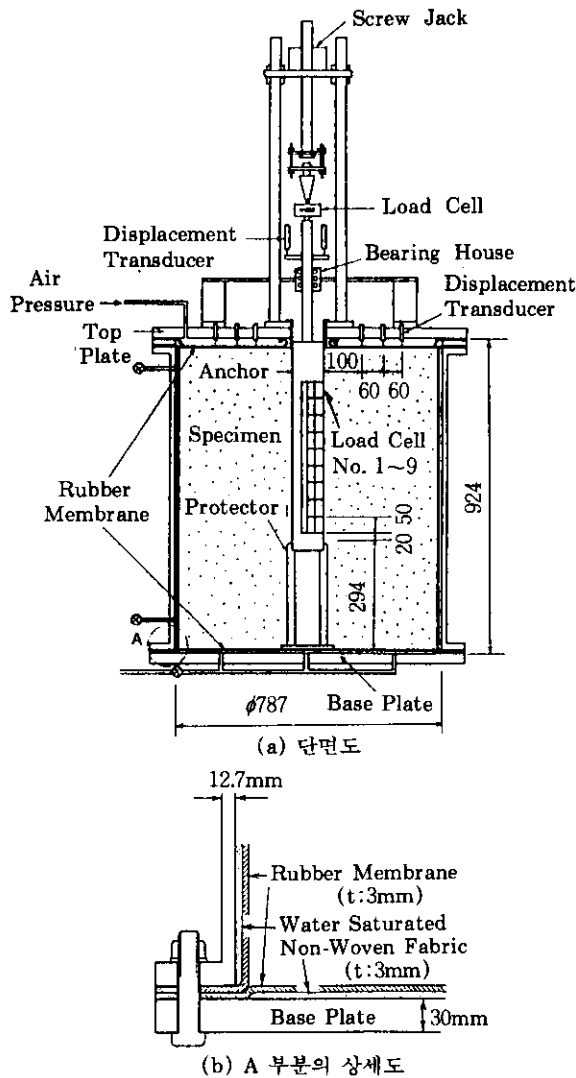


그림 3. 축대칭 앵커의 모형실험 장치, 단위 : mm

표 1 평면변형률 앵커의 인발실험 종류

실험명	앵커 깊이, H(cm)	모형지반			상재압, $\Delta \sigma_v$ (kgf/cm ²)	극한인발력, P_u (kgf/cm)
		단위중량, γ (gf/cm ³)	간극비, e	상대밀도, D_r (%)		
AP2-4	49.3	1.596	0.656	86.27	0.000	2.304
APP17	45.8	1.592	0.661	84.93	0.015	2.939
APP12	45.6	1.612	0.640	90.54	0.065	4.632
APP9	45.7	1.587	0.666	83.60	0.165	7.610
APP8	45.6	1.589	0.664	84.14	0.337	12.350
APP10	45.5	1.590	0.663	84.53	0.454	15.809

3. 실험 결과

3.1 평면변형률 앵커

평면변형률 앵커의 인발실험 종류는 표 1과 같다.

3.1.1 앵커의 인발 변위에 따른 표면 마찰각의 변화

표 1의 각 실험에 대한 앵커 인발 변위에 따른 앵커 표면의 마찰각의 변화는 그림 4와 같다. 이 그림은 실험 APP10의 경우의 앵커 깊이 방향(아래의 곳으로부터 LC1~LC8)의 앵커 변위(δ)와 마찰각(μ_{mob})의 관계를 나타내고 있다. 그런데, 지표면에 상재압을 가하면, 앵커 주변지반은 침하한다. 이 침하량은 아래 곳일수록 큰데, 앵커를 인발하기 전에 이미 침하량만큼의 인발이 생긴 것과 같은 현상이 생긴다. 따라서, 이 그림에서의 "corrected disp."라는 것은 인발 변위 δ 에 각 깊이에서의 앵커 표면의 침하량(선행 변위량)을 더한 값으로 된 변위라는 것을 의미하고 있다. 이 그림으로부터, 앵커 깊이 방향의 최대마찰각은 거의 동일한 δ 에서 발휘된다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 같은 깊이(약 22.5cm)에서의 여러 가지 상재압에 의한 $\delta \sim \mu_{mob}$ 의 관계를 나타내고 있다. 이때의 δ 는 상재압에 의한 침하량은 고려하지 않은 값이며, 상재압의 영향에 대해 이 그림에서는 앵커를 인발하기 전(상재압을 가한 후)의 수직응력(σ_{v0})을 사용해서 나타내고

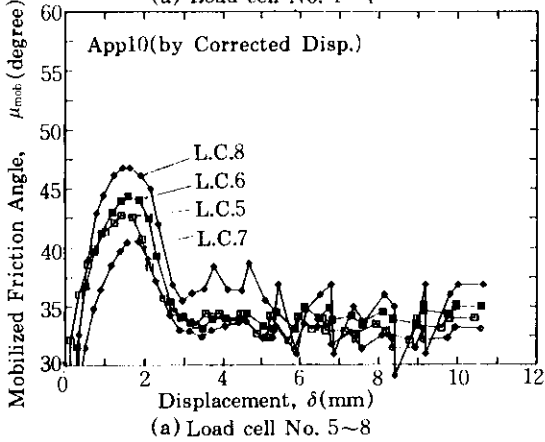
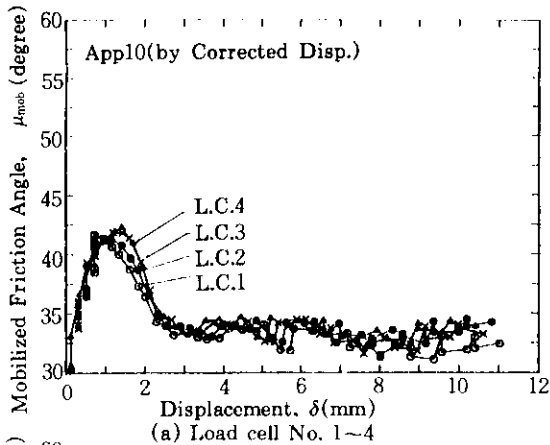


그림 4. 평면변형을 앵커의 인발 변위에 따른 앵커 표면 마찰각의 변화

있다. 이 그림으로부터 최대마찰각에 도달할 때까지의 δ 는 거의 동일($\delta \approx 1\text{mm}$)하지만, 잔류상태에 도달할 때까지의 δ 는 σ_{v0} (또는 상재

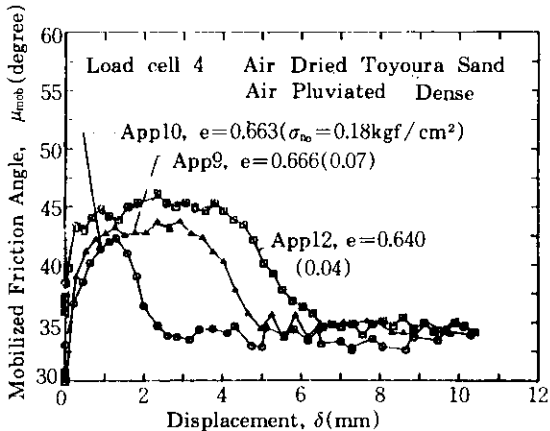


그림 5. 상재압의 크기에 따른 앵커 표면 마찰각의 변화

압)가 높을수록 작다는 것을 알 수 있다. 이것은, 상재압이 높을수록, 앵커 표면 근방의 지반 요소에 집중적으로 전단변형이 발생한다는 것을 의미한다.

3.1.2 앵커 표면의 최대마찰각

앵커 표면의 전단층의 모양을 관찰한 결과⁵⁾, 앵커의 깊이 방향은 단순전단변형에 가까운 변형을 하고 있다는 것을 알았다. 즉, 앵커의 깊이 방향은 무신축방향(無伸縮方向, zero-extension direction, 수직변형률 증분이 발생하지 않는 방향)에 가깝다고 하는 것이다. 이것은, 앵커 표면의 마찰각은 앵커 표면 근방의 지반요소의 전단변형에 의한 응력경각(angle of stress obliquity, 어떤 면에서의 전단응력/수직응력)에 가까울 것이라는 것을 의미한다. 따라서, 본 논문에서는 먼저 앵커 표면근방의 지반요소내에서, 깊이 방향은 무신축방향이라고 가정하고, 앵커표면에서 실측한 수직응력, 전단응력을 사용해서 이것을 입증하는 방법을 선택했다. 이를 위해서, 어떤 깊이에서의 앵커 표면 근방의 지반요소와 같은 조건(밀도, σ_3 , σ_1 방향~퇴적면이 이루는 각도 ω)를 사용한 평면변형을 압축시험으로 구한 무신축방향의 면상의 응력경각의 최대치와 앵커표면의 최대마찰각(μ)을 비교한다.

앵커표면에서 측정된 수직응력(σ_n), 전단응력(τ)을 사용해서 앵커표면 근방의 지반요소의 σ_3 , ω 를 구하기 위해서 그림 6의 반복법을 사용했다. 이 그림에서, 식 (1), (2)는 다음과 같으며, 여기서 ν_a 는 모래의 다이러턴시각이다. 그림 7의 ϕ_{mob} 는 어떤 응력상태에서 동원된 응력경각의 최대치이며, μ_{mob} 는 이때의 앵커표면에서의 마찰각이다.

$$\sin \nu_a = \frac{(1 - K_{sd}) + \sin \phi (1 + K_{sd})}{(1 + K_{sd}) + \sin \phi (1 - K_{sd})} \quad (1)$$

$$\tan \mu = \tan \phi_{ZE} = \frac{\sin \phi \cdot \cos \nu_a}{1 - \sin \phi \cdot \sin \nu_a} \quad (2)$$

이들 식은 동축성(同軸性, CO-AXIALITY,

σ_1 방향= $d\varepsilon_1$ 방향) 가정을 사용하여 유도되었는데, 작은 인발변위가 발생하는 경우는 동축성이 비교적 잘 성립될 것으로 생각된다. Rowe¹²⁾에 의한 식 (1)에서, K_{sd} 는 $R=K_{sd} \cdot D$ (여기서, $R=\sigma_1/\sigma_3$, $D=d\varepsilon_3/d\varepsilon_1$)의 관계로부터 구해지는 상수이다. 豊浦표준사의 K_{sd} 는 Tatsuoka et al.³⁾에 의하면, 구속압이 0.5kgf/cm² 이하의 경우는 구속압이 영향은 없지만, 모래의 강도의 이방성(ω)에 의한 영향은 크다는 것을 알 수 있다. 조밀한 경우의 K_{sd} 를 얻기 위해, 먼저 $v_d=20^\circ$ 로 가정해서 앵커표면 인접의 지반요소의 ω 를 구했는데, 앵커표면의 깊이 방향은 무신축방향이라고 가정했고 퇴적면이 수평면이므로 $\omega=45^\circ+\frac{v_d}{2}=55^\circ$ 이다. 이 ω 에서의 K_{sd} 는 약 3.4이다.

무신축방향의 면(즉, 앵커표면) 상의 응력경각의 최대값(μ)은 Davis¹³⁾에 의한 식 (2)로부터 구해진다. 이 식의 ϕ_{ZE} 는 무신축방향의 면상의 응력경각의 최대값이다.

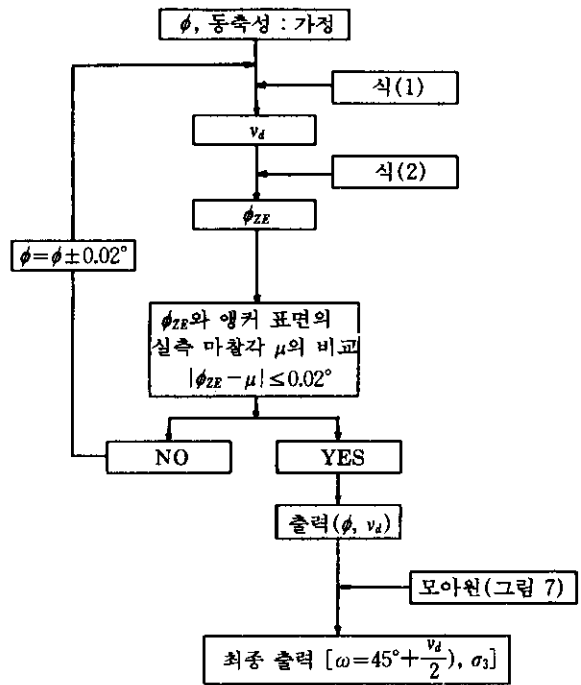
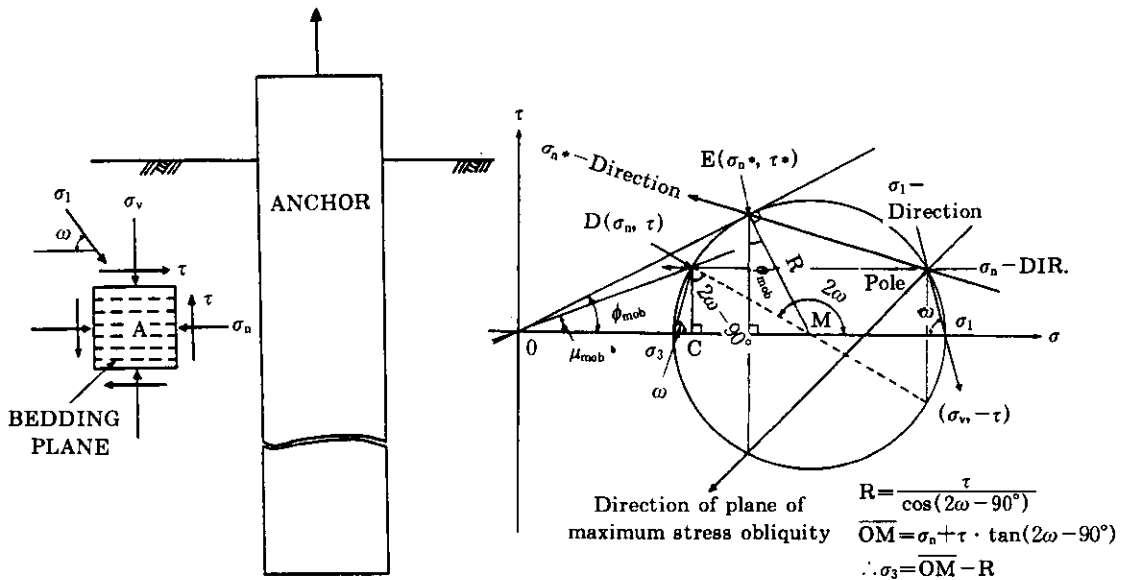


그림 6. 앵커 표면에 인접한 지반요소의 구속압(σ_3)과 ω ($=\sigma_1$ ~퇴적면의 각도)를 구하는 흐름도



(a) 앵커 표면 지반요소의 응력 방향들

(b) 요소 A의 응력에 대한 모아원

그림 7. 앵커 표면에 인접한 지반요소의 구속압(σ_3)과 ω ($=\sigma_1$ ~퇴적면의 각도)를 구하는 모아원

표 2는 그림 6의 계산으로부터 구한 각각의 깊이에서의 σ_3 , $\omega(=45^\circ + \nu_d/2)$ 를 이용해서, 같은 밀도에서의 豊浦표준사의 평면변형을 압축시험^{3),7)}에 의해 구한 전단저항각(내부마찰각) ϕ_{ps} 와 ϕ_{ps} 를 이용해서 식 (2)에 의해 구한

ϕ_{ZE} 를 나타낸다. 또, μ 는 앵커표면에서 실측한 최대마찰각이며 ϕ_{psa} 는 그림 7의 모아원을 이용해서 구한 앵커 인접 지반요소의 전단저항각이다. 여기서, H는 앵커 길이, z는 측정 깊이이다.

표 2 평면변형을 앵커 표면의 최대마찰각 발회시의 수직응력, 전단응력을 사용하여 계산된 값들

(a) 실험 AP2-4

깊이비, z/H	μ (degree)	σ_3 (kgf/cm ²)	ω (degree)	ϕ_{psa} (degree)	ϕ_{ps}	ϕ_{ZE} (degree)
0.33	45.2	0.006	56.1	49.9	47.9	42.8
0.43	44.6	0.013	55.8	49.5	47.8	42.8
0.53	44.6	0.009	55.7	49.3	47.8	42.8
0.63	43.1	0.011	55.4	49.0	47.8	42.7
0.73	42.9	0.010	54.7	48.0	47.7	42.6
0.83	43.1	0.009	55.1	48.6	47.7	42.7
평균값	43.9	—	55.5	49.1	47.8	42.7

(b) 실험 APP17

깊이비, z/H	μ (degree)	σ_3 (kgf/cm ²)	ω (degree)	ϕ_{psa} (degree)	ϕ_{ps}	ϕ_{ZE} (degree)
0.17	43.3	0.006	55.0	48.4	47.4	42.4
0.28	45.5	0.009	56.9	51.0	47.7	42.6
0.38	43.6	0.013	54.4	47.6	47.4	42.3
0.49	46.0	0.014	56.6	50.7	47.7	42.6
0.60	42.4	0.015	54.2	47.3	47.3	42.3
0.71	45.0	0.018	56.5	50.6	47.6	42.6
0.82	41.1	0.018	52.6	45.0	47.1	42.0
평균값	43.8	—	55.2	48.7	47.5	42.4

(c) 실험 APP12

깊이비, z/H	μ (degree)	σ_3 (kgf/cm ²)	ω (degree)	ϕ_{psa} (degree)	ϕ_{ps}	ϕ_{ZE} (degree)
0.16	41.0	0.019	53.3	46.0	48.4	43.3
0.27	44.1	0.032	55.5	49.1	48.7	43.7
0.38	44.0	0.028	55.4	49.0	48.7	43.6
0.49	46.5	0.025	57.2	51.4	48.9	43.9
0.60	46.3	0.027	57.1	51.4	48.9	43.9
0.71	45.7	0.028	56.6	50.7	48.9	43.8
0.82	45.5	0.017	56.6	50.6	48.9	43.8
평균값	44.7	—	56.0	49.7	48.8	43.7

(d) 실험 APP9

깊이버, z/H	μ (degree)	σ_3 (kgf/cm ²)	ω (degree)	ϕ_{psa} (degree)	ϕ_{ps}	ϕ_{ZF} (degree)
0.38	41.4	0.053	52.8	45.2	46.8	41.8
0.49	43.6	0.047	55.1	48.6	47.2	42.1
0.60	44.7	0.040	56.1	50.0	47.3	42.3
0.71	40.7	0.043	52.9	45.4	46.9	41.8
0.82	41.4	0.031	53.5	46.2	46.9	41.9
평균값	42.4	—	54.1	47.1	47.0	42.0

(e) 실험 APP8

깊이버, z/H	μ (degree)	σ_3 (kgf/cm ²)	ω (degree)	ϕ_{psa} (degree)	ϕ_{ps}	ϕ_{ZE} (degree)
0.38	42.1	0.090	54.1	47.1	47.1	42.1
0.49	41.9	0.088	53.6	46.4	47.1	42.0
0.60	42.5	0.072	54.7	47.9	47.2	42.2
0.71	38.7	0.067	52.0	44.1	46.8	41.8
0.82	39.4	0.056	51.1	42.7	46.7	41.6
평균값	40.9	—	53.1	45.6	47.0	41.9

(f) 실험 APP10

깊이버, z/H	μ (degree)	σ_3 (kgf/cm ²)	ω (degree)	ϕ_{psa} (degree)	ϕ_{ps}	ϕ_{ZE} (degree)
0.16	41.7	0.056	51.6	43.4	46.8	41.8
0.27	41.4	0.094	53.6	46.4	47.1	42.1
0.38	41.7	0.095	53.7	46.6	47.1	42.1
0.49	42.1	0.100	54.2	47.3	47.2	42.2
0.60	42.6	0.077	54.6	47.8	47.3	42.2
0.71	44.4	0.061	55.7	49.4	47.4	42.4
0.82	40.5	0.056	51.6	43.5	46.8	41.8
평균값	42.1	—	53.6	46.3	47.1	42.1

3.1.3 앵커 표면에서의 응력경로

그림 8은 실험 APP10의 경우의 수직응력과 전단응력의 경로를 깊이 방향으로 대표적인 3개소에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 앵커 표면의 응력 경로는 Kamenov⁽¹¹⁾

에 의한 정체적전단시험에서의 응력경로와 대단히 비슷하므로 앵커 표면에서는 수평 방향으로 어떤 위치에서 구속된 형태의 전단거동을 하는 것으로 판단된다[앵커 주변 지반의 거동에 대해서는 문헌 10) 참조].

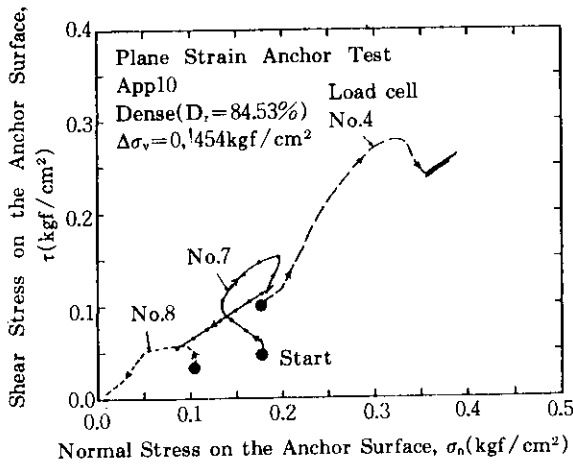


그림 8. 평면변형률 앵커 표면의 응력경로

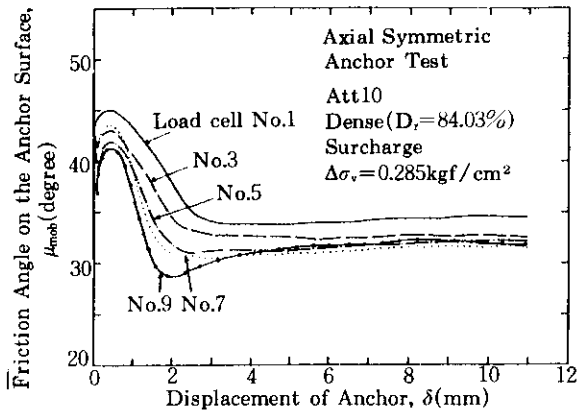


그림 10. 축대칭 앵커의 인발 변위에 따른 앵커 표면 마찰각의 변화

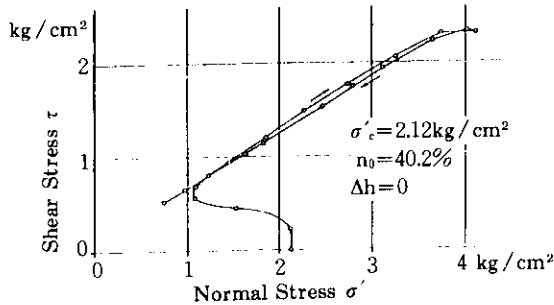


그림 9. 모래 시료의 정체적 전단시험에서의 응력경로¹¹⁾

3.2 축대칭 앵커

축대칭 앵커의 일반실험 종류는 표3과 같다.

3.2.1 앵커의 인발 변위에 따른 표면 마찰각의 변화

표 3의 각 실험에 대한 앵커 인발 변위에 따른 앵커 표면의 마찰각은 그림 4, 5와 마찬가지로 깊이 방향으로 거의 같은 변화를 보였다 (그림 10참조).

표 3 축대칭 앵커의 인발실험 종류

실험명	앵커 깊이, H(cm)	모형지반			상재압, Δσᵥ (kgf/cm)	극한인발력, Pₑ (kgf)
		단위중량, γ (gf/cm³)	간극비, e	상대밀도, Dᵣ (%)		
ATT10	59	1.587	0.664	84.03	0.285	491.75
ATT 5	59	1.581	0.672	81.99	0.997	1258.56

3.2.2 앵커 표면의 최대마찰각

축대칭 앵커의 경우도 평면변형률 앵커의 경우와 비슷하게 2방향(직경 방향과 연직 방향)만 자유로운 변위 발생이 되고 그 외에는 구속되어 있다는 점에서 비슷하다(평면변형률 앵커는 직경이 무한대인 축대칭 앵커로 볼 수 있으므로). 따라서, 지반의 전단저항각으로써 마찰각을 구하는 방법은 3.1.2항의 평면변형률 앵커의 경우와 동일하다.

표 4는 3.1.2항의 방법으로 구한 여러가지 계산치들인데, 각 기호의 정의는 표 2와 동일하다.

3.2.3 앵커 표면에서의 응력경로

그림 11은 축대칭 앵커 표면에서의 2개소에 대해 그린 응력 경로를 나타낸다. 이 그림에서도 평면변형률 앵커의 경우의 그림 8과 비슷하게 정체적 전단거동과 유사한 거동을 하는 것을 알 수 있다.

표 4 축대칭 앵커 표면의 최대마찰각 발휘시의 수직응력, 전단응력을 사용하여 계산된 값들

(a) 실험 ATT10

깊이버, z/H	μ (degree)	σ_3 (kgf/cm ²)	ω (degree)	ϕ_{psa} (degree)	ϕ_{ps}	ϕ_{ZE} (degree)
0.25	45.1	0.067	56.2	50.2	47.4	42.4
0.33	42.8	0.082	54.7	47.9	47.2	42.2
0.42	44.8	0.034	56.1	50.0	47.4	42.4
0.50	45.6	0.031	56.4	50.3	47.5	42.4
0.58	43.9	0.032	55.5	49.1	47.3	42.3
0.67	43.8	0.029	55.2	48.7	47.3	42.2
0.75	44.9	0.025	56.1	50.0	47.4	42.4
0.84	45.2	0.022	56.1	50.0	47.4	42.4
0.92	41.4	0.053	53.6	46.4	47.1	42.0
평균값	44.2	-	55.5	49.1	47.3	42.3

(b) 실험 ATT5

깊이버, z/H	μ (degree)	σ_3 (kgf/cm ²)	ω (degree)	ϕ_{psa} (degree)	ϕ_{ps}	ϕ_{ZE} (degree)
0.25	35.9	0.282	49.8	40.8	46.0	41.0
0.33	34.5	0.174	48.9	39.3	45.9	40.9
0.42	33.5	0.164	48.2	38.3	45.8	40.7
0.50	36.0	0.138	49.8	40.8	46.0	41.0
0.58	35.0	0.133	49.3	40.0	46.0	40.9
0.67	37.1	0.108	50.6	42.0	46.2	41.1
0.75	37.8	0.200	51.2	42.8	46.3	41.2
0.84	40.1	0.153	52.7	45.2	46.5	41.4
0.92	40.4	0.084	52.8	45.3	46.5	41.5
평균값	36.7	-	49.9	41.6	46.1	41.0

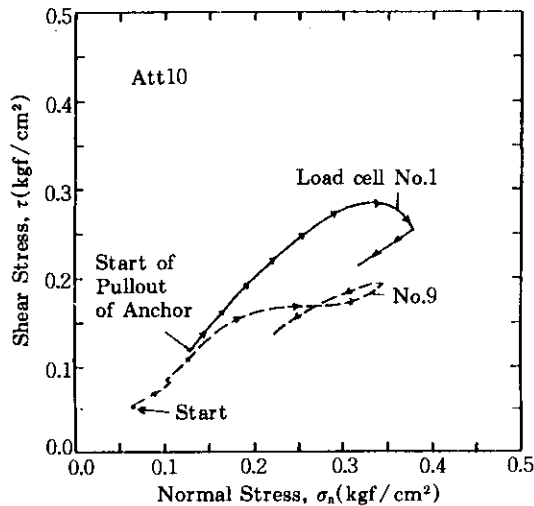


그림 11. 축대칭 앵커 표면의 응력 경로

4. 실험 결과의 고찰

표 2와 표 4에서 실측마찰각(μ)과, 평면변형률 압축시험 결과를 이용하여 이론적으로 구한 무신축방향의 면 상의 응력경각(ϕ_{ZE})의 평균값을 정리하면 표 5 및 그림 12와 같다.

그림 12에서 다음과 같은 것을 알 수 있다.

(1) 평면변형률 앵커 표면의 최대마찰각 μ 는, 평면변형률 압축시험의 ϕ_{ZE} (동축성 가정 포함)와 거의 일치한다. 따라서, 앵커표면 근방의 지반요소의 앵커의 깊이 방향은 무신축방향이라고 말할 수 있다.

표 5 μ , ϕ_{ps} , ϕ_{ZE} 의 평균값 비교

실험명	상재압, $\Delta \sigma_v$ (kgf/cm ²)	지반의 상대밀도, D.(%)	$\bar{\mu}$ (degree)	$\bar{\phi}_{ps}$ (degree)	$\bar{\phi}_{ZE}$ (degree)
평면변형률	AP2-4	0.000	86.27	43.9	47.8
	APP17	0.015	84.93	43.8	47.5
	APP12	0.065	90.54	44.7	48.8
	APP9	0.165	83.60	42.4	47.0
	APP8	0.337	84.14	40.9	47.0
	APP10	0.454	84.53	42.1	47.1
축대칭	ATT10	0.285	84.03	44.2	47.3
	ATT5	0.997	81.99	36.7	46.1

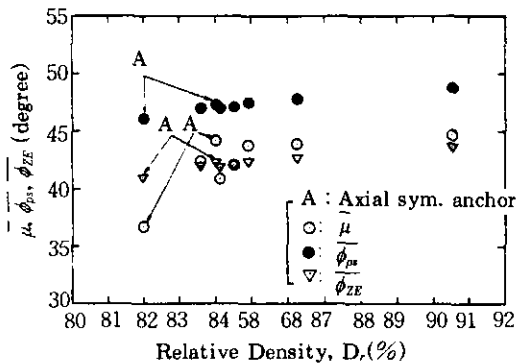


그림 12. 실측 평균마찰각($\bar{\mu}$), 모래의 전단저항각(ϕ_{ps}), 계산된 평균마찰각($\bar{\phi}_{ZE}$)의 비교

(2) 앵커 표면 마찰각을 구하기 위해 평면변형률 압축시험을 행할 때, 모래의 강도의 이방성(ω), 구속압의존성(σ_3) 등을 고려해야 한다.

(3) ϕ_{ps} 는 μ 보다 커서 설계시 μ 의 값으로 ϕ_{ps} 를 사용하는 것은 위험측이 된다.

5. 결 론

건조 모래 지반내의 연직 강체 앵커에 대한 모형 인발시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다. 단, 이 결론은 앵커 표면에서 파괴면이 발생하는 정규압밀지반에 대한 것이다.

(1) 앵커표면 근방의 지반요소에서, 앵커 깊이 방향의 파괴면의 특성방향은 무신축방향이다.

(2) 앵커표면의 최대마찰각은 평면변형률 앵커, 축대칭앵커 공히 평면변형률 압축시험에 의한 전단저항각(ϕ_{ps})보다는 무신축방향의 면상의 응력경각의 최대치(ϕ_{ZE})에 가까우므로, 설계시 최대마찰각으로 ϕ_{ZE} 를 사용함이 타당하고 안전측이 된다(ϕ_{ZE} 는 식 (1), (2)를 이용해서 구할 수 있다). 이것은, 동축성 가정을 사용한 결과로서, 실제로 동축성이 성립하는지 여부는 정확히는 알 수 없지만, 실용상 이 가정을 사용해도 별 오차가 없을 것으로 생각된다.

(3) 앵커 표면의 응력 경로는 정체적 전단시험의 경우와 비슷하다.

(4) 축대칭 앵커의 마찰각과 평면변형률 앵커의 마찰각이 비슷하고, 평면변형률 앵커가 축대칭 앵커의 직경이 무한대인 특별한 경우라는 점을 감안할 때, 마찰각은 앵커의 직경에는 무관하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 아직 축대칭 앵커에 관한 실험이 부족하여 명확하게 말하기는 어렵지만 실용상의 사용가능성을 고려해서 내린 결론이다. 본 연구에서는 축대칭 앵커에 대해서는 경향을 파악했으나, 앞으로 보다 많은 실험을 통해서 이를 명확히 증명할 계획이다.

참 고 문 헌

1. Uesugi, M. and Kishida, H.(1986), "Frictional

- resistance at yield between dry sand and mild steel", *Soils and Foundations*, Vol. 26, No.4, pp.139-149.
2. Wernick, E.(1977), "Stresses and strains on the surface of anchors," 9th ICSMFE, Ground anchors. pp.113-119.
 3. Tatsuoka, F., Sakamoto, M. and Kawamura, T.(1986), "Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressure", *Soils and Foundations*, Vol. 26, No. 1, pp.65-84.
 4. 林 鍾鐵, 龍岡 文夫(1987), "砂地盤内の平面ひずみ模型鉛直 アンカ-表面の應力状態", 第22回日本土質工學研究發表會, pp. 1361-1364.
 5. 林 鍾鐵, 龍岡 文夫, 井川 廣視(1988), "模型鉛直アンカ-周邊砂地盤の破壊モード", 第23回日本土質工學研究發表會, 1988. 6, pp. 1687-1690
 6. 宮崎 啓一, 林 鍾鐵, 龍岡 文夫(1988), "砂地盤内の鉛直アンカ-の引抜き実験", 第24回日本土質工學研究發表會, pp. 1491-1494.
 7. 龍岡 文夫, プラダン テ-ジ B.S., 林 煥群, 堀井 宣幸(1987), "各種のせん断試験による砂の内部摩擦角", *土と基礎*, Vol.35, No.12, pp.55-60.
 8. 林 鍾鐵(1989), "砂地盤内のグラウンドアンカ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.
 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-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, 龍岡 文夫, 朴 性栽(1990.3), "平面變形率 状態에 있는 鉛直 地盤앵커의 破壊모-드", *大韓土質工學會誌*, 第6巻, 第1號, pp. 43-56.
 11. Kamenov, B.(1976), "The constant volume shear box tests of sand", *Proc. 5th Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Budapest*, pp. 75-81.
 12. Rowe, P.W.(1969), "The relations between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear", *Geotechnique*, Vol.19, No.1, pp.75-86.
 13. Davis, E.H.(1968), "Theories of plasticity and the failure of soil masses", *Soil Mechanics—selected topics*(ed. Lee, I.K.), Butterworths, p.372.

(접수일자 1995. 9. 11)