

砂質土에서 補强材의 引拔力에 관한 研究

THE STUDY ON THE PULL-OUT RESISTANCE OF REINFORCEMENT IN SAND

김 상 규, SANG KYU KIM 정희원, 동국대학교 교수, Professor, Dongguk University
이 은 수, EUN SOO LEE 정희원, 보강기술(주), E & S Engineering Co., Ltd.
김 경 모, KYEONG MO KIM 정희원, 보강기술(주), E & S Engineering Co., Ltd.

개요(SYNOPSIS) :

In this study, the Serial Disk Anchor has been proposed as new reinforcement which will be used in reinforced earth retaining wall. The test equipment which was used in this study is large scale pull-out test machine of which dimensions are 1340 mm × 800 mm × 800 mm(L × B × H). And Jumunjin K.S. sand were used as backfill material.

Firstly, to investigate the pull-out force of the Disk Anchor with various disk diameter(B), the Disk Anchor buried in sand were pulled out under various applied normal stress(σ_n). And then the pull-out test for the Serial Disk Anchor with various disk spacing(S) were conducted in sand. From the test results, the degree of interference(DI) with spacing ratio(S/B) were determined and based on the concept of degree of interference, the bond coefficient of multiple disk anchor in sand were proposed.

1. 서론

1.1. 연구 목적

보강토 용역은 1980년 국립건설연구원이 국내에 소개, 시험시공한 이래 1980년대 중반 섬유보강재 도입을 계기로 본격적으로 보급되기 시작하였다. 보강토용역의 국내 도입초기에는 기술자들의 인식부족으로 인해서 널리 사용되지 못하였으나, 시공경험이 늘어남에 따라 그 경제성, 시공성, 뛰어난 외관, 시공속도 등의 장점을 인정받아 날로 그 시공실적이 늘어나고 있다. 또한 그에 따른 연구가 활발히 진행되어 많은 연구성적을 보이고 있다. 그러나 이러한 발전된 이론을 실제구조물에 적용하기에는 좀 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각되고, 아직은 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 현재까지 발전된 이론을 바탕으로 하여 현재까지 개발된 보강재의 상당수를 검토한 결과 소형의 디스크가 연속으로 밀린 Serial Disk Anchor를 새로운 보강재로 생각하게 되었으며, 이에 대한 인발시험을 통하여 Serial Disk Anchor의 부착능력과 실무에 적용 가능성이부를 조사하고 실제 설계에 적용할 수 있는 부착계수를 결정하고자 한다.

1.2. 연구 방법 및 내용

본 연구에서 보강재의 인발시험장치로 [그림 1]과 같은 대형인발시험기를 사용하였으며, 보강재의 인발은 전동모터에 의해서 이루어지며, 1 mm/min.으로 인발속도를 고정시켰다. 시험결과 발생한 인발변위, 인발력 등의 모든 데이터는 TDS 302 Data Logger에 의해서 자동으로 측정기록된다.

또한 본 시험에서 채움재는 주문진 표준사를 사용하였으며, 토조안에 모래를 조심스럽게 채워 넣은 다음 물을 뿌려주어 되도록 균질한 지반을 형성할 수 있도록 하였다. 이렇게 하여 형성된 모델지반은 약 55% ~ 60%의 상대밀도를 나타내었다. 보강재 시편은 [표 1]과 같이 제작하였으며, 붕마찰의 영향을 없애기 위하여 붕에 관을 뚫었다.

이러한 방법으로 Disk Anchor와 Serial Disk Anchor에 대한 인발시험을 행하여 디스크 직경(B)과 상재하중(σ_n)의 변화에 따른 인발력의 변화를 조사하여 각 조건에 대해 변위에 따른 인발력의 추정식을 유도하고, Serial Disk Anchor에 대해서는 디스크 사이의 간격비(S/B)에 따른 상호간섭의 영향과 디스크의 직경에 따른 최적의 간격비(S/B)를 결정하고 이러한 시험결과를 바탕으로 하여 실무에 적용할 수 있는 부착계수(f_b)를 결정하고자 한다.

2. 문헌 고찰

2.1. 흙과 보강재 사이 결속에 관한 기존 이론

흙과 보강재 사이의 결속능력에 대한 일반적인 표현방법은 다음 식(1)과 같다.(Jewell(1990))

$$P = 2 L_r W_r \sigma_n' f_b \tan \phi \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, P : 보강재의 인발력
- L_r : 보강재의 길이
- W_r : 보강재의 폭
- σ_n' : 보강재 위에 작용하는 수직응력
- f_b : 결합계수(bond coefficient) (= $\tan \delta / \tan \phi$)
- ϕ : 흙의 내부마찰각

그러나 불가 탈린 평형 보강재 또는 그리드형의 보강재인 경우에는 위의 식(1)만으로는 충분히 표현할 수 없고, 보강재의 인발력(P)은 다음 식 (2)와 같이 표면마찰성분(P_s)과 수동지지에 저항성분(P_b)의 합으로 나타낼 수 있다.(Jewell (1990), Hansman (1990) 등)

$$P = P_s + P_b \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서 P : 보강재의 전체인발력
- P_s : 표면마찰에 의한 인발력
- P_b : 수동지지에 의한 인발력

그리드형 보강재에서 전체표면적($A_r = L_r \cdot W_r$) 가운데 표면마찰성분의 면적비를 α_s 로 표시하면, 식(2)에서 표면마찰 면에 의한 인발력(P_s)은 다음과 같이 표시된다.

$$P_s = 2 \alpha_s L_r W_r \sigma_n' \tan \delta \dots\dots\dots (3)$$

또한 지지부재의 전체 폭에 대한 지지에 유효한 폭의 비율을 α_b 라고 하면 수동지지에 의한 인발력(P_b)은 다음과 같다.

$$P_b = \left(\frac{L_r}{S} \right) W_r \alpha_b B \sigma_b' \dots\dots\dots (4)$$

- 여기서 S : 지지부재 사이의 거리
- L_r : 그리드의 길이
- W_r : 그리드의 폭
- B : 지지부재의 직경
- σ_b' : 지지부재에 작용하는 지지응력.

또한 식(3)과 식(4)를 식(2)에 대입하여 식(1)과 비교·정리하면 부착계수(f_b)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f_b = \alpha_s \left(\frac{\tan \delta}{\tan \phi} \right) + \left(\frac{\alpha_b B}{S} \right) \left(\frac{\sigma_b'}{\sigma_n'} \right) \frac{1}{2 \tan \phi} \dots (5)$$

2.2. 인발저항력과 인발변위와의 관계

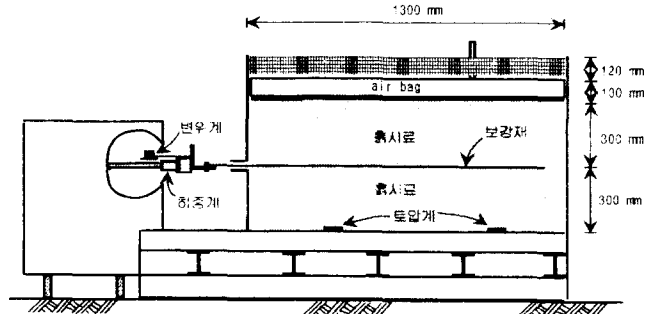
Bergado 등(1992)은 Clough와 Duncan(1971)의 hyperbolic 모델은 이용해서 인발변위에 대한 그리드형 보강재의 독립된 지지부재에서 동원된 인발 저항력의 크기를 추정하기 위한 식을 다음과 같이 나타내었으며, 이를 변수 가운데 E_{ip} 와 σ_{bult} 는 흙과 보강재의 특성에 따라서 결정된다.

$$\sigma_b = \frac{d_n}{\frac{1}{E_{ip}} + \frac{d_n}{\sigma_{bult}}} \dots\dots\dots (6)$$

- 여기서 σ_b : 인발변위 d_n 에서의 인발력(응력)
- d_n : 지지부재의 직경으로 나눈 인발변위
- E_{ip} : 인발력-인발변위 관계곡선에서 초기경사
- σ_{bult} : 극한인발력(응력)

2.3. 지지부재의 상호간섭에 대한 기존 이론

앞에서 언급하였듯이 그리드형 보강재의 인발저항력은 표면마찰저항과 지지부재의 지지저항의 조합으로 이루어지지만, 이러한 것들의 연구에 의하면 두 성분의 발생 시점과 크기에는 차이가 있어 마찰저항보다는 지지저항이 더 늦게 유발되고 전체인발력의 약 90%를 차지 한다. 그러므로 보강재의 인발력은 지지저항만에 의한 것으로 생각해도 될 것 이다.



[그림 1] 대형인발시험기의 개략도

[표 1.] 시험에 사용된 보강재

시험 번호	세로방향 부재의 직경 (d, mm)	디스크의 직경 (B, mm)	지지부재의 수 (n, 개)	지지부재 사이의 거리 (S, mm)	지지부재의 간격비 (S/B)	비고
1	10	30	1			Disk Anchor
2	10	50	1			
3	10	60	1			
4	10	70	1			
5	10	50	9	75	1.5	Serial Disk Anchor
6	10	50	7	100	2	
7	10	50	5	150	3	
8	10	50	3	300	6	
9	10	50	2	600	12	

Palmeira와 Milligan(1989)은 실험결과에 의하여 그리드형 보강재의 부착계수(bond coefficient)는 횡방향 지지부재 사이의 상호간섭에 크게 영향을 받는다는 것을 밝혔다. 또한 이들은 지지부재 상호간의 간섭의 영향을 *DI* (Degree of Interference)로 표시하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$DI = 1 - \frac{P}{nP_o} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 *DI* : 상호간섭의 정도(Degree of Interference)
P : *n*개의 지지부재를 가진 그리드의 최대인발력
P_o : 독립된 한개 지지부재의 최대인발력
n : 그리드 지지부재의 수

간섭에 영향을 끼치는 주된 요소는 홈 입자의 모양과 표면의 거칠기를 포함한 홈의 특성과 지지부재의 직경, 지지부재 사이의 거리, 지지부재의 수 등이 있다. 그러므로 상호간섭 정도에 대한 위의 식(7)은 다음과 같은 형식으로도 표현할 수 있다.

$$DI = f(nB/S) \dots\dots\dots (8)$$

n = *L_r*/*S*일 때

$$DI = f(L_r B/S^2) \dots\dots\dots (9)$$

여기서 *B* : 지지부재의 직경
S : 지지부재 상호간의 거리
L_r : 보강재의 길이
n : 보강재의 길이 *L_r* 속에 포함된 지지부재의 수

Jewell 등(1984)은 *DI*의 원리를 근거로 그리드의 지지방향에 의한 부착계수(bond coefficient)를 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$f_b = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} = (1 - DI) \cdot \frac{B}{S} \cdot \frac{\sigma_b}{2 \sigma_n \tan \phi} \dots\dots (10)$$

여기서 *f_b* : 부착계수(bond coefficient)
 δ : 홈과 보강재 사이의 마찰각
 ϕ : 흙의 내부마찰각
DI : 상호간섭의 정도(Degree of Interference)
B : 지지부재의 직경
S : 지지부재 사이의 거리
 σ_b : 지지응력(bearing stress)
 σ_n : 수직응력(vertical stress)

3. 보강재에 대한 인발시험결과

3.1. Disk Anchor

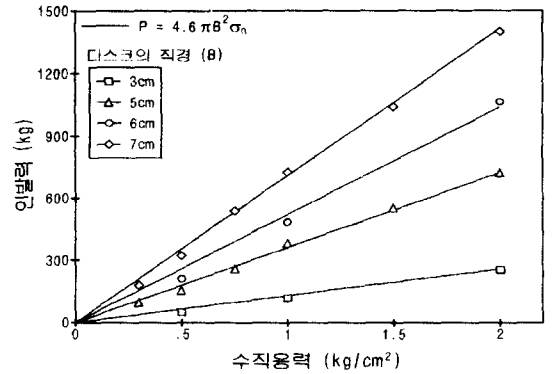
3.1.1. 디스크 직경과 수직응력의 변화에 따른 인발력의 변화

[그림 2.]는 수직응력의 변화에 따른 인발력의 변화를 디스크의 직경에 따라 나타낸 것이다. 이 그림에서 선으로 표시된 것은 지지부재의 직경과 가해진 수직응력을 이용한 다음과 같은 식에 의해서 추정된 값이다.

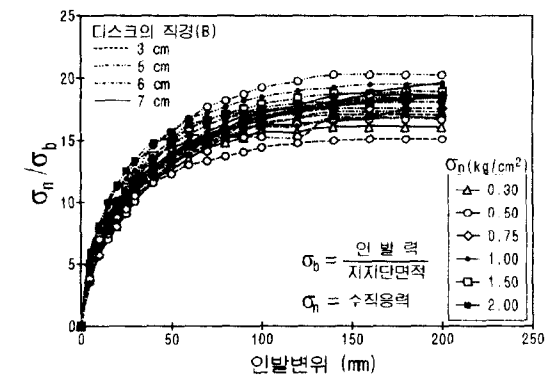
$$P_{ult} = 4.6 \times \pi \times B^2 \times \sigma_n \dots\dots\dots (11)$$

여기서 *P_{ult}* : 극한인발력(kg)
B : 디스크의 직경(cm)
 σ_n : 가해진 수직응력(kg/cm²)

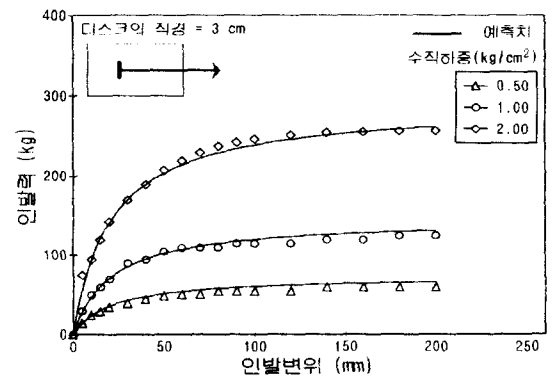
3.1.2. 인발력과 인발변위와의 관계



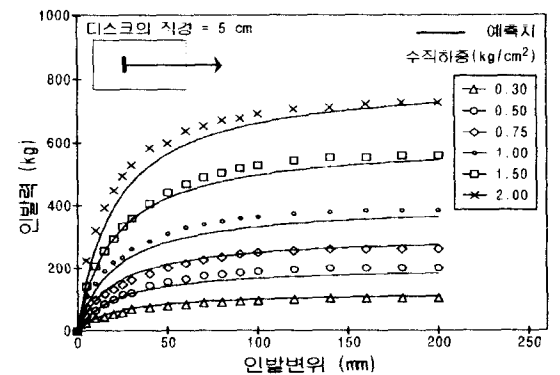
[그림 2.] 가해진 수직응력의 변화에 따른 인발력의 변화



[그림 3.] 인발변위에 따른 σ_n/σ_b 의 변화



[그림 4.] 인발시험결과 (B = 3 cm 인 경우)



[그림 5.] 인발시험결과 (B = 5 cm 인 경우)

[그림 3.]은 Disk Anchor에 대한 인발시험결을 지지부재의 지지면적($\pi B^2/4$)과 가해진 수직응력(σ_n)으로 정규화한 값(σ_b/σ_n)을 인발변위(d)에 따라 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면 정규화된 인발력(σ_b/σ_n)은 인발변위가 커질 때 어떤 값(15 ~ 21)에 수렴하여, 일반적인 steel grid보강재에 대한 인발시험결과와 곡선형태가 비슷하다. 따라서 steel grid보강재에서와 마찬가지로 식(6)과 같은 hyperbolic model을 사용해서 인발력과 인발변위와의 관계를 나타낼 수 있고, 본 시험에 사용된 사질토의 경우에 정규화된 인발력(σ_b/σ_n)은 다음 식(4. 2)와 같이 예측할 수 있다.

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_n} = \frac{d}{\frac{1}{0.971} + \frac{d}{20.40}} \dots\dots\dots (12)$$

위의 식에서 d는 인발변위(mm)를 나타내고 σ_n 는 인발력을 디스크의 지지단면적으로 나눈값이고, σ_n 은 가해진 수직응력이다. 따라서 위의 식을 사용하여 인발력을 추정하기 위해서는 식(12)의 계산결과에 디스크의 면적과 가해진 수직응력을 곱하면 된다.

[그림 4.], [그림 5.], [그림 6.], [그림 7.]은 식(12)로부터 예측된 인발력과 시험에 의해서 측정된 인발력을 비교한 것이다. 이들 그림에서 보면 식에 의한 예측치가 실험에 의한 실측치와 비교적 잘 일치하지만 가해진 수직응력이 0.5 kg/cm²이하인 경우에는 예측치가 약간 크게 평가되는 경향이 있고, 1.0 kg/cm² 이상인 경우에는 약간 작게 평가되는 경향이 있다.

그런데 실제 보강토 용벽 구조물에서 수직응력이 낮은 용벽의 상부에서는 디집유발응력으로 인하여 토파하중 보다 더 큰 압력을 받고 있을 것으로 예상된다. [그림 8.]은 디집유발력을 주기 위해서 먼저 큰 압력의 상재압을 가한 다음 하중을 제거한 후 인발시험을 행한 시험결과인데, 이 그림에서 보면 선형압력을 가한 때의 인발력이 선형압력을 가하지 않은 경우보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 디집유발응력에 기인된 것으로 생각되고, 따라서 0.5 kg/cm²의 낮은 압력하에서의 약간 크게 평가되는 것은 실제 적용에 큰 문제가 되지 않을 것으로 생각된다.

3.2. Serial Disk Anchor

3.2.1. 상호간섭의 영향

[그림 9.], [그림 10.], [그림 11.]은 Serial Disk Anchor에 대한 인발시험결과로서, 이 때 사용된 디스크의 직경은 5 cm이다.

이 그림에서 보면 디스크 사이의 거리가 60 cm인 경우와 30 cm인 경우에는 디스크가 1개인 경우와 곡선 모양이 유사하여, 변위가 증가하면 인발력은 어떤 값에 수렴한다. 그러나 디스크 사이의 거리가 15 cm 보다 작아지면 비교적 작은 변위에서 인발력은 점추치를 나타내고, 이 때의 최대인발력은 예측치에 훨씬 못 미치는 결과를 나타낸다. 이렇게 인발력과 인발변위와의 관계곡선의 모양이 바뀌는 것은 Serial Disk Anchor의 인발에 대한 저항구조가 바뀌기 때문으로 생각된다. 즉, 디스크 사이의 거리가 비교적 먼 경우에는 [그림 12.] a)와 같이 개개의 지지부재가 지지방향에 의해서 인발에 저항하는 지지저항구조이지만, 디스크 사이의 거리가 가까워지면 디스크 상호간의 간섭의 영향으로 인하여 [그림 12.] b)와 같이 디스크의 직경과 같은 직경의 봉상 보강재의 마찰저항력에 의해 인발에 대해서 저항하는 마찰저항구조가 된다. 모래 속에 묻힌 Serial Disk Anchor의 저항구조가 바뀌는 거리는 디스크 직경의 3 ~ 6배 사이에 있다.

그러나 보강토 용벽에서의 허용할 수 있는 변위는 그렇게 크지 않으므로 여기서는 허용변위를 20 mm로 가정하고, 이 때의 DI와 f_b에 대한 경험식을 유도하고자 한다.

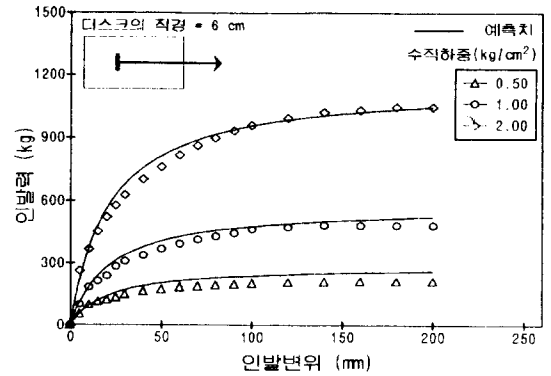
[그림 13.]은 허용변위 20 mm에서 디스크 사이의 간섭비(S/B)의 변화에 따른 상호간섭정도(DI)를 나타낸 것으로, 이 그림으로부터 다음과 같은 상호간섭에 대한 경험식을 도출할 수 있다.

$$DI = 0.8 - \frac{0.4}{1 + \sigma_n} \cdot \frac{S}{B} \dots\dots\dots (13)$$

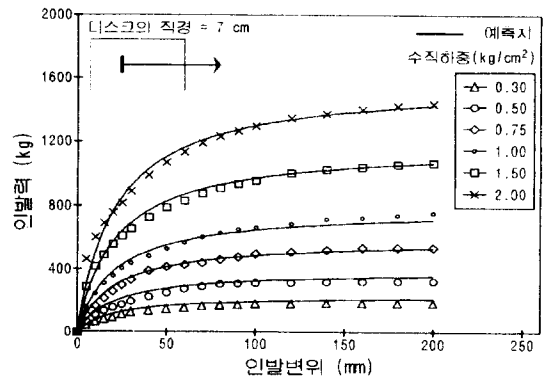
위의 식에서 DI는 상호간섭의 정도로서 부차원이며 항상 0보다 크거나 같아야 한다. 또한 σ_n 은 kg/cm²으로 표시된 수직응력이다. 따라서 상호간섭의 영향이 일어나기 시작하는 간섭비는 식(13)으로부터 다음과 같이 된다.

$$S/B = 2(1 + \sigma_n) \dots\dots\dots (14)$$

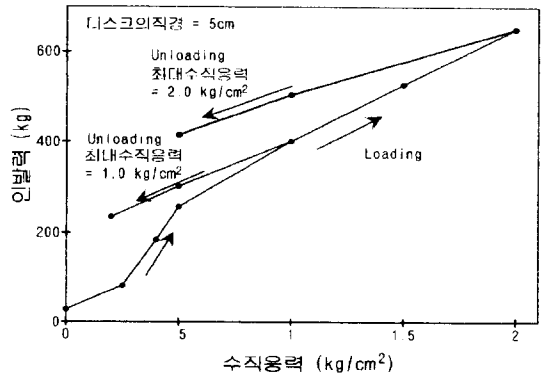
3.2.2. 부착계수(f_b)의 결정



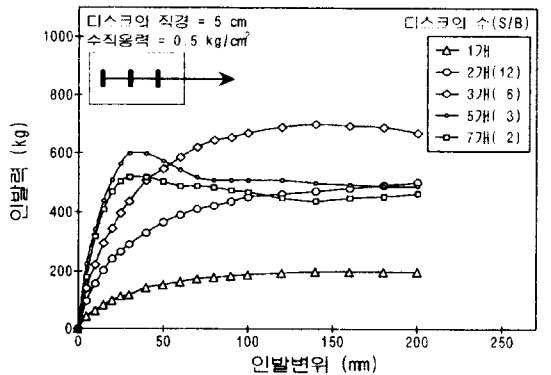
[그림 6.] 인발시험결과 (B = 6 cm 인 경우)



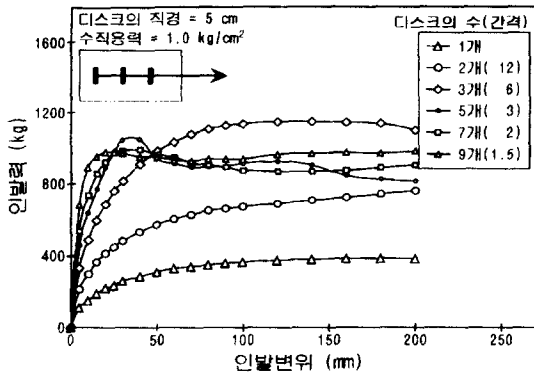
[그림 7.] 인발시험결과 (B = 7 cm 인 경우)



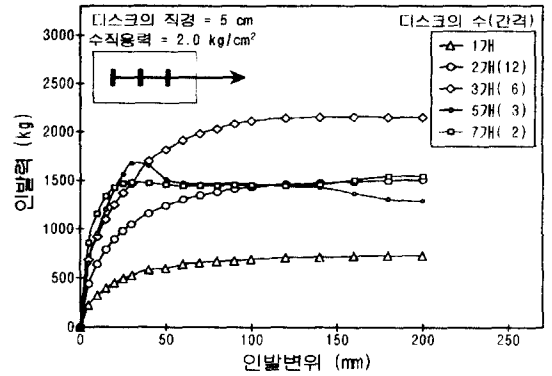
[그림 8.] 인발시험결과 (Unloading, B = 5 cm)



[그림 9.] 인발시험결과 (Serial Disk Anchor, $\sigma_n=0.5$ kg/cm²)



[그림 10.] 인발시험결과(Serial Disk Anchor, $\sigma_v=1.0$ kg/cm²)



[그림 11.] 인발시험결과(Serial Disk Anchor, $\sigma_v=2.0$ kg/cm²)

직경이 B인 봉상 보강재의 표면마찰에 의한 인발력은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = \pi \cdot B \cdot L_r \cdot \sigma_n \cdot f_b \cdot \tan \phi \quad \dots (15)$$

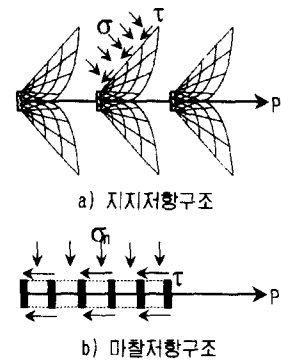
또한 Serial Disk Anchor의 지지저항력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_b = (1 - DI) \cdot n \cdot \sigma_b \cdot \frac{\pi \cdot B^2}{4} \quad \dots (16)$$

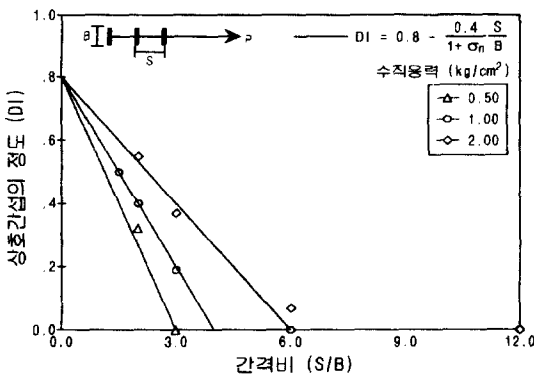
식(15)와 식(16)을 같다고 보면 부착계수 f_b 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_b = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} = (1 - DI) \cdot \frac{B}{S} \cdot \frac{\sigma_b}{4 \cdot \sigma_n \cdot \tan \phi} \quad \dots (17)$$

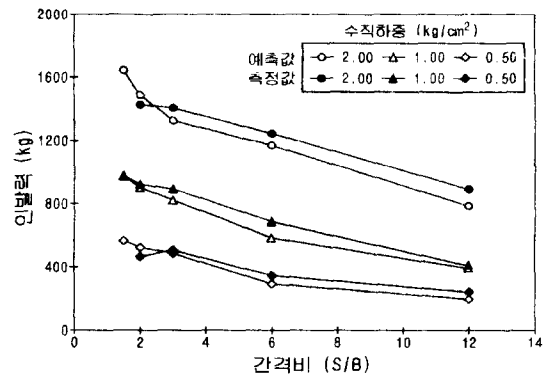
- 여기서, P_f : 표면마찰에 의한 인발력
- P_b : 지지부재의 수동지지에 의한 인발력
- σ_n : 수직응력(kg/cm²)
- σ_b : 지지응력(kg/cm²)
- DI : 상호간섭의 정도
- n : 지지부재의 수 (= L_r/S 의 정수부분)
- S : 지지부재 사이의 거리(cm)
- B : 지지부재의 직경(cm)
- L_r : 보강재의 길이



[그림 12.] Serial Disk Anchor의 저항구조



[그림 13.] 허용변위 20 mm에서 간격비(S/B)의 변화에 따른 상호간섭의 정도(DI)



[그림 14.] 예측치와 실측치의 비교

따라서 식(13)에서 구한 DI 를 식(17)에 대입하면 부착계수 f_b 를 계산할 수 있고, 이를 다시 식(15)에 대입하면 Serial Disk Anchor의 인발력을 계산할 수 있다. [그림 14.]는 식에 의해서 예측된 인발력과 실험에 의해서 측정된 인발력을 비교한 것인데, 식에 의한 예측치가 다소 안전측임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 사질토 속에 묻힌 Serial Disk Anchor에 대한 인발시험결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 디스크가 한개인 경우에 대한 인발시험결과에서 인발력은 디스크의 지지단면적과 가해진 수직응력에 비례한다는 것을 알 수 있고, 디스크형 앵커의 최대인발력(P_{ult})은 다음 식에 의해서 추정할 수 있다.

$$P_{ult} = 4.6\pi B^2 \sigma_n$$

2. 인발변위에 따른 인발력은 다음 식에 의해서 추정할 수 있고, 이 식에 의한 추정치는 시험에 의한 결과와 매우 잘 맞는다.

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_n} = \frac{d}{\frac{1}{0.971} + \frac{d}{20.40}}$$

3. 허용변위가 20 mm일 경우 Serial Disk Anchor에서 상호간섭의 영향이 생기기 시작하는 간격비는 가해진 수직응력의 크기에 따라서 달라지며 수직응력이 증가할수록 그 간격비는 커진다. 이 때의 상호간섭의 정도는 다음 식과 같은 경험식으로 나타낼 수 있다.

$$DI = 0.8 - \frac{0.4}{1 + \sigma_n} \cdot \frac{S}{B}$$

4. Serial Disk Anchor의 부착계수는 다음 식과 같이 나타낼 수 있고, 이 식에 의한 예측치는 다소 안전측이다.

$$f_b = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} = (1 - DI) \cdot \frac{B}{S} \cdot \frac{\sigma_b}{4 \cdot \sigma_n \cdot \tan \phi}$$

5. 그러나 4.항의 부착계수를 실무에 그대로 적용하기에는 약간의 무리가 있고, 실무에의 적용을 위해서는 실제 현상도를 사용한 인발시험이 선행되어야 할 것으로 생각한다.

5. 참고문헌

- Bacot, J., Ittis, M., Lareal, P., Paumier, T. and Sanglerat, G., 1978, "Study of the soil reinforcement friction coefficient", Proceedings of ASCE Symposium Earth Reinforcement, Pittsburg, pp. 157 ~ 185.
- Bassett, R. H., 1978, "Underreamed ground anchors", Rev. Fr. Geotechnique AIAIE Laboratoire National des Ponts et Chaussees Jan. pp. 11 ~ 17.
- Bergado, D. T., Chai, J. C. and Balasubramaniam, A. S., 1992, "Interaction between grid reinforcement and cohesive frictional soil", Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement Practice, pp. 29 ~ 34.
- Bergado, D. T., Cisneros, C. B., Shivashankar, R., Alfaro, M. C. and Sampado, C. L., 1989, "Pull-out resistance of steel grids with weathered clay backfill", Proceedings of the Symposium on the Application of Geosynthetic and Geofibre in Southeast Asia, Malaysia, pp. 1-26 ~ 1-34.
- Chai, J. C., 1992, "Interaction between grid reinforcement and cohesive-frictional soil and performance of reinforced wall/ embankment on soft ground", Doctorial Engineering Dissertation, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Jewell, R. A., 1990 "Reinforcement bond capacity", Geotechnique, Vol. 40 No. 3, London, pp. 513 ~ 518.
- Jewell, R. A., Milligan, G. W. E., Sarsby, R. W. and Dubois, D., 1984, "Interaction between soil and geogrids", Proceedings of the Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering, Thomas Telford Ltd., London, pp. 19 ~ 29.
- Milligan, G. W. E., 1993, "Mechanics of reinforced soil : action and interaction", Reinforced Soil : mechanics and design - A short course at Oxford University, pp. 5.1 ~ 5.27.
- Milligan, G. W. E. and Palmeira, E. M., 1987, "Prediction of bond between soil and reinforcement", The International Symposium on Prediction and Performance in Geotechnical Engineering , Calgary, pp. 147 ~ 153.
- Palmeira, E. M. and Milligan, G. W. E., 1989, "Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand", Geotechnique, Vol. 39 No. 3, London, pp. 511 ~ 524.
- Peterson, L. M. and Anderson, L. R., 1980, "Pullout resistance of welded wire mesh embedded in soil", Utah State University, Logan, Utah, Repoodtto the Hilfilker Cympany.
- Schlosser, F. and Elias, V., 1978, "Friction in reinforced earth", Proceedings of ASCE Symposium Earth Reinforcement, Pittsburg, pp. 735 ~ 762.