

## 토목섬유와 SANDMAT로 보강한 지반의 지지력 연구

### Bearing Capacity of Soft Ground Reinforced by Geosynthetics and Sand Mat

주재우<sup>1</sup> Ju, Jae-Woo 박종범<sup>2\*</sup> Park, Jong-Beom  
서계원<sup>3</sup> Seo, Kyeh-Won 장민호<sup>4</sup> Jang, Min-Ho

#### ABSTRACT

In order to improve the bearing capacity of soft ground for the purpose of getting a trafficability of construction vehicles, the geosynthetics-sandmat system has often been used. Yamanouchi had proposed the equation of calculating the bearing capacity about this kind of bearing mechanism, which has a soft ground-geosynthetics-sandmat system. The bearing capacity equation by Yamanouchi has been widely using in our country. However this equation includes an important contradictory concept because if the contact width of vehicles is increased to reduce the contact pressure, the bearing capacity is decreased on the contrary according to this equation. In order to investigate this contradictory concept, the bearing capacity test has been performed on the soft model ground with geosynthetics-sandmat system. From the test results about various kinds of models, the principle that explain the contradictory concept has been found and on the basis of this principle the new bearing capacity equation has been proposed by modifying Yamanouchi equation.

#### 요 지

연약지반처리를 위해 바로 장비가 진입하기 어려운 경우에, 적절한 강도를 갖는 토목섬유를 부설하고 그 위에 샌드매트층(Sand Mat)을 형성시켜 기초지반의 지지력을 증가시킨다. 이러한 보강메카니즘에 대한 지지력을 평가하는 식은 Yamanouchi (1985)가 제안하였다. 우리나라의 경우 주로 Yamanouchi가 제안한 식을 사용하여 설계를 행하고 있다. 그러나, 제안식에서 접지압을 감소시킬 목적으로 접지폭원을 증대시키면 오히려 지지력은 감소하고 소정의 안전율을 얻기 위해서는 성토두께를 증가해야 하는 등 지지력 산정에 있어서 논리적인 모순점을 내포하고 있다. 이러한 논리적인 모순점을 검토하기 위해서 모형토조에 연약지반을 조성하여 지지력실험을 실시하였다. 연약지반자체, 연약지반위에 보강재를 포설했을 때, 포설된 보강재에 인위적으로 인장력을 가했을 경우, 샌드매트층을 포설했을 때, 다른 조건을 일치시키며 단지 재하판의 폭을 달리 했을 때 등으로 나누어 모형재하시험을 행하였다. 실험결과를 다양하게 분석하였으며 특히 Yamanouchi가 제안한 식이 갖는 모순점을 설명하는 새로운 지지력식을 제안하였다.

**Keywords** : Sandmat, Geosynthetics, Bearing capacity, Spreading angle

#### 1. 서 론

준설점토지반과 같은 초연약지반을 개량하기에 앞서 Trafficability 확보를 위한 다양한 종류의 표층처리공법이 선시공된다. 이 중 Sand Mat와 토목섬유를 활용한 표층처리

공법의 보강메카니즘과 지지력의 평가에 대해서는 Yamanouchi (1985)가 제안한 이론을 주로 적용하는데 이 중 Yamanouchi가 제안한 식은 접지압을 감소시킬 목적으로 접지폭원을 증대시키면 오히려 지지력은 감소하고 소정의 안전율을 얻기 위해서는 성토두께를 증가해야 하는 등 지지력 산정

1 정회원, 순천대학교 토목환경공학부 교수 (Professor, Dept. of Civil & Enviro. Eng., Univ. of Suncheon National)

2\* 정회원, 순천대학교 공업기술연구소 연구원 (Research Fellow, Research Center of Industrial Technology, Univ. of Suncheon, E-mail: bankgeo@hanmail.net)

3 정회원, 순천대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Ph.D.Student., Dept. of Civil & Enviro. Eng., Univ. of Suncheon)

4 순천대학교 대학원 토목공학과 석사졸업 (Graduated Student., Dept. of Civil & Enviro. Eng., Univ. of Suncheon)

에 있어서 논리적인 모순점을 내포하고 있다(양기석 등, 2003; 주재우 등, 2004). 이러한 논리적인 모순점을 검토하기 위해서 Sand Mat와 토목섬유를 활용한 표층처리공법의 지지력을 검토하기 위하여 실내모형실험을 실시하였으며, 이를 분석한 결과 Yamanouchi 제안식이 갖는 모순점을 수정하여 새로운 지지력식을 제안하였다. 더불어 여러 요인에 의하여 하중분산각이 변화하는 경향을 확인할 수 있었는데 본 연구에서는 하중분산각의 변화를 고찰하기 위한 실험을 수행하였다. 그 결과 하중분산각에 영향을 미치는 요소와 경향을 분석할 수 있었다.

## 2. 보강시 지지력 효과에 대한 이론적 검토

### 2.1 Yamanouchi의 제안식

아래 그림 1은 연약지반 위에 토목섬유를 포설했을 경우, 발생하는 지지력의 메카니즘을 나타낸 것이다. Terzaghi는 지지력의 증가를 토목섬유의 유발인장력, 토목섬유의 막 효과, 침하된 부분의 부력효과 등으로 고려하여 Sand Mat층이 없는 경우 식 (1)과 같이 지지력식을 제안하였다.

$$q_{u-1} = 5.3 \cdot c + \frac{2T_a \cdot \sin\theta_2}{B} + \frac{T_a}{r} + \gamma_t \cdot D_f \quad (1)$$

여기서,  $c$  : 점착력  $T_a$  : 보강재의 인장력  $\theta_2$  : 보강재가 수평면과 이루는 각  $r$  : 영향원의 반지름  $\gamma_t$  : 지반의 단위중량  $D_f$  : 재하면의 침하깊이

Yamanouchi는 식 (1)을 바탕으로 하여 Sand Mat층이 포설된 경우에서의 지지력을 구하는 식을 식 (5)로서 제안하였다. 즉 샌드매트층이 없는 경우의 식 (1)의 지지력  $q_u$ 를 Sand Mat층이 있는 경우의 지지력과의 구분을 위해  $q_{u-1}$ 로 표기하며, 샌드매트층이  $d$ 의 깊이로 존재하는 경우 하중의 분산이 깊이에 따라 2 : 1로 분산된다고 가정하면 아래의 평형식을 얻게 된다.

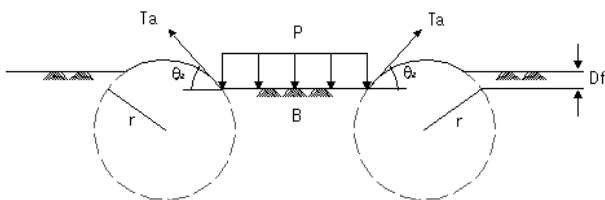


그림 1. Terzaghi의 수정 지지력식의 모델

$$q_u \cdot B = q_{u-1} \cdot [B + (d - D_f)] \quad (2)$$

$$q_u = \left(1 + \frac{d - D_f}{B}\right) \cdot q_{u-1} \quad (3)$$

식 (3)에 식 (1)을 대입하면 아래 식 (4)와 같이 된다.

$$q_u = \left(1 + \frac{d - D_f}{B}\right) \left[5.3c + T_a \cdot \left(\frac{2\sin\theta_2}{B} + \frac{1}{r}\right) + \gamma_t \cdot D_f\right] \quad (4)$$

여기서, Yamanouchi는 토목섬유와 흙 사이에 발생하는 전단저항력에 의한 지지력 증가항을 추가로 포함시켜서 최종적으로 식 (5)와 같은 지지력 산정식을 제안하였다.

$$q_u = \left(1 + \frac{d - D_f}{B}\right) \left[5.3c + T_a \cdot \left(\frac{2\sin\theta_2}{B} + \frac{1}{r}\right) + \frac{4S_a R(1 - \cos\theta_2)}{B + d - D_f} + \gamma_t \cdot D_f\right] \quad (5)$$

### 2.2 Yamanouchi제안식의 수정

지표면에 작용하는 접지하중은 지표면에서는 큰 값이 되나, 지중으로 깊어질수록 하중은 분산되면서 결국 사라진다. Sand Mat층의 두께가 크면 클수록 하중분산효과가 큰 이유가 바로 여기에 있다. 보통 간략한 설계에서 지중의 하중분산각  $\theta_1$ 을 깊이 2, 분산 1이라는 개념을 도입하여 26.57°로 하여 사용하고 있다. 그러나, 하중분산각은 재하중의 폭, Sand Mat층의 두께에 의해 영향을 받을 수 있다. 특히 연약지반-토목섬유-Sand Mat시스템에서는 하중을 받으면 인장력을 발휘하는 토목섬유가 포설되어 있기 때문에 하중분산각  $\theta_1$ 의 결정에 언제나 일정하게 2:1이라는 개념을 사용하는 것은 문제가 된다. 따라서, 하중분산각은 식 (6)과 같은 관계를 상정할 수 있다.

$$\theta_1 = f(B, d) \quad (6)$$

식 (6)에서처럼 분산각을 하중재하폭 B와 Sand Mat층

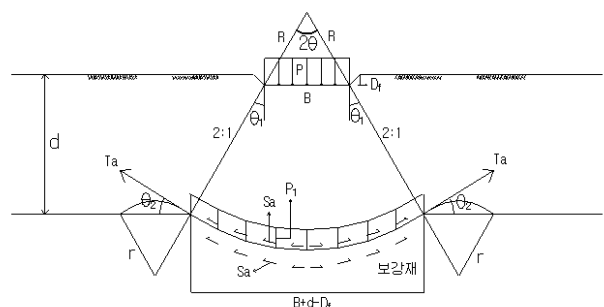


그림 2. Yamanouchi제안식의 모델

의 두께  $d$ 의 함수로 본다면 Sand Mat층 두께  $d$ 를  $2d \tan\theta_1$ 이라 하여 Yamanouchi가 제안했던 식에 대입하면 아래 식 (7)과 같이 나타낼 수가 있다.

$$q_u = \left(1 + \frac{2d \tan\theta_1 - D_f}{B}\right) \left[5.3c + T_c \left(\frac{2 \sin\theta_2}{B} + \frac{1}{r}\right) + \frac{4S_u R(1 - \cos\theta_2)}{B + 2d \tan\theta_1 - D_f}\right] + \gamma_1 D_f \quad (7)$$

### 2.3 하중분산각의 산정방법

Sand Mat 층의 두께가 0인 경우에 지지력을  $q_{u-1}$ , Sand Mat층의 두께가 변화할 때의 지지력을  $q_u$ 로 가정할 때, 샌드매트층이  $d$ 의 깊이로 존재하는 경우 하중의 분산이 깊이에 따라 2:1로 분산된다고 가정하면 식 (8)과 같은 평형식을 얻게 되며 이 식은 다시 식 (9)와 같이 정리될 수 있다.

$$q_u \cdot B = q_{u-1} \cdot [B + (d - D_f)] \quad (8)$$

$$q_u = \left(1 + \frac{d - D_f}{B}\right) \cdot q_{u-1} \quad (9)$$

그러나, 실제로는 2:1 분포가 아니며, 하중분산각으로  $\theta_1$ 으로 존재하게 될 것이다. 따라서 식 (9)에서  $d$ 를  $2 \cdot d \cdot \tan\theta_1$ 으로 대입하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$q_u = \left(1 + \frac{2d \tan\theta_1 - D_f}{B}\right) \cdot q_{u-1} \quad (10)$$

위의 식 (10)으로부터 하중분산각  $\theta_1$ 을 구하는 식 (11)를 유도할 수 있다.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left\{ \frac{B}{2d} \left( \frac{q_u}{q_{u-1}} - 1 \right) + \frac{D_f}{2d} \right\} \quad (11)$$

표 1. 준설토의 물리적 특성

비 중	액성한계	소성한계	소성지수	#200번체통과량	흙의 분류(USCS)
2.69	39.2 %	17.0 %	22.2 %	98%	CL

표 2. 토목섬유 제품특성

특성	중량	재질	비중	인장강도	인장신도	투수계수	봉합강도
종류							
직포(GM 5t/m)	150g/m <sup>2</sup>	Polyester	1.36	127kg/in	10~30%	10 <sup>-4</sup> cm/s	127kg/in

표 3. 주문진표준사의 물리적 특성

물리적성질	비 중	최대밀도 $\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	최소밀도 $\gamma_{dmin}(g/cm^3)$	모델지반의 밀도
시료종류				
주문진 표준사	2.67	1.654	1.398	1.569

## 3. 시험장치 및 방법

### 3.1 사용재료 및 모형지반제작

모형지반을 제작하기 위한 흙은 여수시 국가산업단지 조성공사 현장 내에서 채취한 준설매립토를 사용하였으며, 토목섬유는 직포 GM 5t/m를 그리고 Sand Mat재료는 주문진 표준사를 이용하였다. 준설매립토의 물리적 특성과 토목섬유의 제품특성 및 주문진표준사의 물리적 특성은 다음 표 1, 표 2, 표 3과 같다. 모형지반 제작순서는 다음과 같다. (1) 채취해 온 준설토를 대형 용기에 저장하였다. (2) 대형용기에 저장된 흙을 함수비가 100%가 되도록 조정 후 교반시켜 균일한 지반특성을 갖도록 하였다. (3) 인위적으로 조제된 점성토를 모형토조에 투입하여, 40cm 높이의 연약지반을 조성하였다. (4) 상부에 샌드매트층을 형성하는 경우에는 다중체강사법을 이용하여 균질한 성질을 갖는 Sand Mat층이 되도록 하였다.

### 3.2 모형시험장치 및 실험방법

모형시험장치는 그림 3과 같이 모형토조, 재하대, 재하장치, 다중체강하장치, Data Logger 등으로 구분할 수 있으며, 평면변형조건으로 실험할 수 있는 장치이다. 토조크기는 폭 120cm, 길이 30cm, 최대높이 70cm이며, 토조의 양 측벽은 2cm두께의 투명아크릴을 사용하여 제작하였으며, 실험도중 측면에서 발생하는 마찰저항을 없애기 위하여 그리이스를 도포하였다. 그리고 인위적으로 토목섬유에 인장력을 가해 줄 수 있는 장치를 부착하여 미리 토목섬유에 소정의 인장력이 가해진 상태에서의 재하시험을 행할 수 있도록 하였다. 사진 1과 사진 2는 인장력을 가하

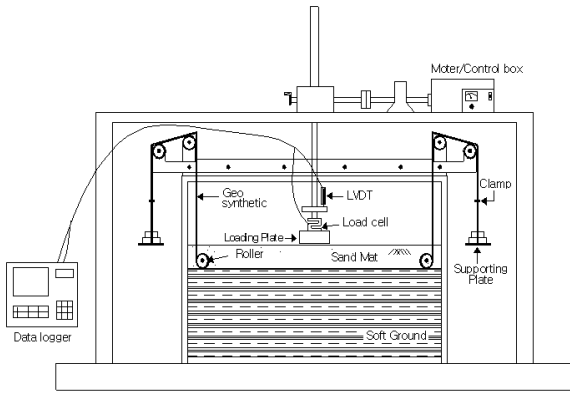


그림 3. 모형재하실험장치



사진 1. 토목섬유 인장구속 상태(측면)

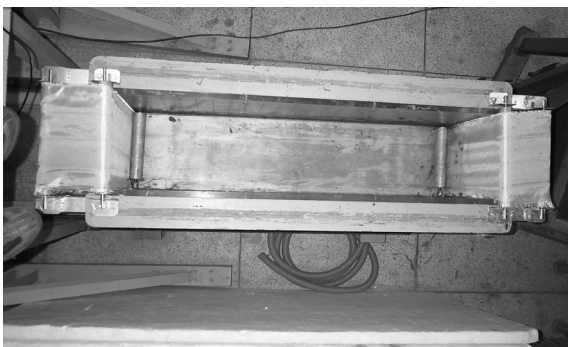


사진 2. 토목섬유 인장구속 상태(위)

고 있는 상태를 보여준 것이다. 재하판은 각각 10×29cm와 20×29cm 등 두 종류를 사용하였고, 재하실험은 재하하중 및 침하를 동시에 측정하였으며, 하중재하속도는 약 1mm/min으로 하였다.

### 3.3 실험내용

보강재 사용여부, 재하판의 크기, Sand Mat층의 두께, 보강재에 부과시키는 인장력의 크기 등을 변수로 하여 표 4에 나타난 조건 하에서 실험을 수행하였다. 재하시험 중에 침하되는 거동을 관찰하였으며, 특히 보강재가 수평면과 이루는 각을 측정하였다.

## 4. 시험결과 및 고찰

### 4.1 인장력의 크기에 따른 연약지반-토목섬유 시스템의 지지력 고찰

연약지반, 연약지반-토목섬유(No tension), 연약지반-토목섬유-인장(인장력-5, 10, 15, 20kg/29cm)등 세 종류의 지반에 대해 지지력 실험을 실시한 결과를 나타낸 것이 그림 4이다. 그림 3으로부터 토목섬유에 인장력이 크게 작용할수록 지지력은 커지는 경향을 알 수 있다. 이는 보강재의 인장구속에 의한 지지력 보강효과와 측방용기를 억제하는 막효과에 의한 것이라 말할 수 있다. 연약지반으로만 실험한 경우에는 극한지지력이 나타났지만 토목섬유로 보강한 경우는 변곡점은 존재하지만 침하와 더불어 계속적으로 지지력은 증가하고 있어서 극한지지력을 정확히 정의할 수 없었다. 그림 5는 침하량이 30mm가 되었을때의 지지력을 구하여 인장력과의 관계를 나타낸 것이다. 토목

표 4. 모형재하시험 조건

TEST. No	하중판 폭 (cm)	Sand Mat 두께 (cm)	인장력 (kg)	토목섬유 포설 유·무	TEST. No	하중판 폭 (cm)	Sand Mat 두께 (cm)	인장력 (kg)	토목섬유 포설 유·무
1	10	0	0	×	11	10	5	20	○
2	10	0	0	○	12	10	10	20	○
3	10	0	5	○	13	10	15	20	○
4	10	0	10	○	14	20	0	0	×
5	10	0	15	○	15	20	0	0	○
6	10	0	20	○	16	20	0	10	○
7	10	5	0	○	17	20	5	10	○
8	10	5	10	○	18	20	10	10	○
9	10	10	10	○	19	20	15	10	○
10	10	15	10	○	-	-	-	-	-

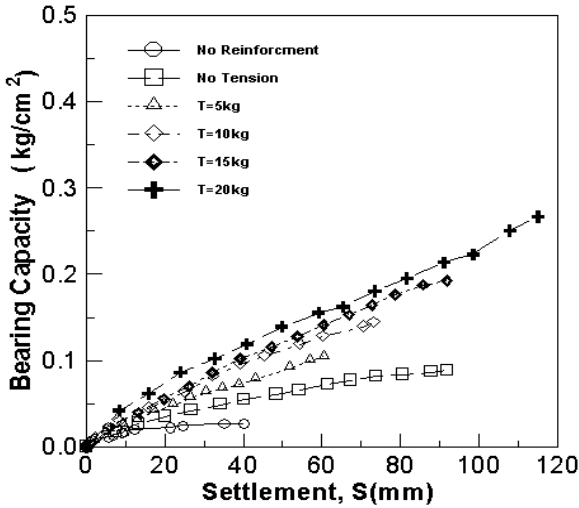


그림 4. 토목섬유 인장구속에 따른 지지력과 침하곡선

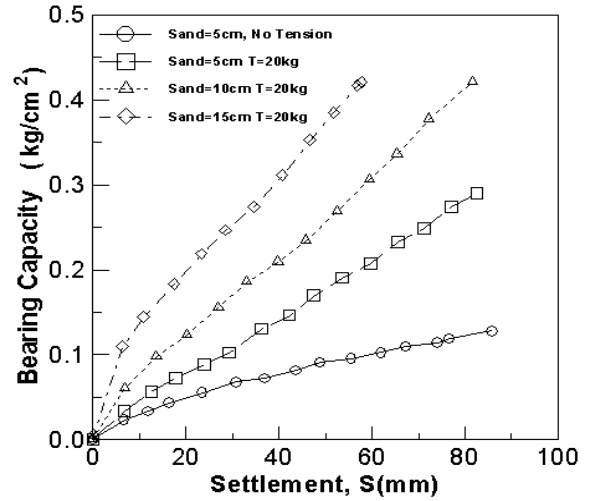


그림 6. Sand Mat 두께에 따른 지지력과 침하곡선

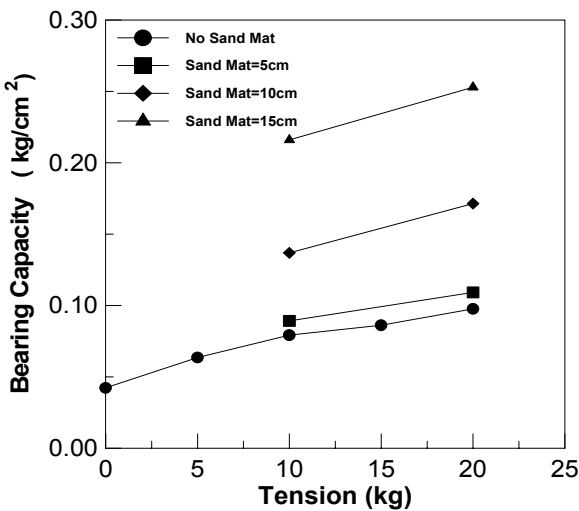


그림 5. 인장력 증가에 따른 지지력(S=30mm)

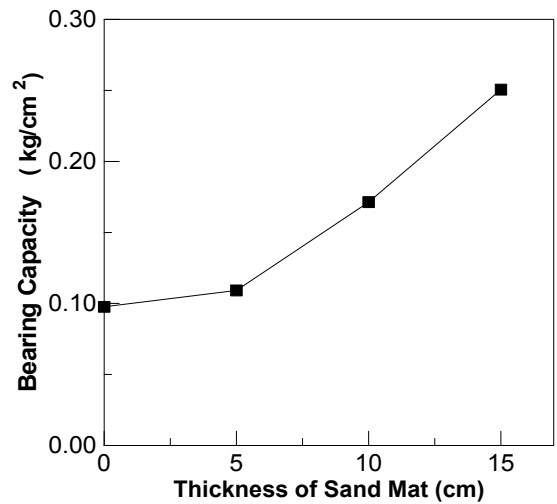


그림 7. Sand Mat 두께에 따른 지지력(S=30mm)

섬유에 걸리는 인장력의 크기가 클수록 지지력은 일정한 경향으로 증가하는 특징을 보였다.

#### 4.2 Sandmat층의 두께가 지지력의 증가에 미치는 영향

그림 6은 인장력을 가하지 않은 5cm Sand Mat와 각각 5, 10, 15cm의 Sand Mat 포설시 20kg의 인장력이 작용하는 경우의 침하에 따른 지지력을 나타낸 것이다. 초기에 약간의 곡면부가 형성되었으나 대부분 침하의 증가와 더불어 지지력도 계속 직선적으로 상승하는 경향을 보였다. 그리고, Sand Mat 두께가 클수록 큰 지지력을 나타내어 Sand Mat의 두께가 클수록 응력의 분산효과가 크다는 것이 잘 설명되고 있음을 알 수 있었다. 그림 7은 침하량이 30mm 인 경우의 지지력을 Sand Mat층의 두께에 따라 나타

낸 것으로 지지력은 5cm 경우는 증가폭이 크지 않았지만 10cm, 15cm의 경우는 증가폭이 상당히 큰 경향을 보였다.

#### 4.3 재하판의 크기에 따른 지지력 고찰

그림 8, 9, 10, 11은 각각 Sand Mat를 포설하지 않은 경우와, 5cm, 10cm, 15cm의 Sand Mat를 포설한 모형지반에 대해 재하판 폭의 변화에 따른 침하비와 지지력의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 침하비(S/B)란 침하량(S)을 접지폭(B)으로 나눈 것으로 정의하였다.

그림 8은 Sand Mat가 없는 경우의 지지력을 비교한 것으로서 재하판의 크기가 다름에도 불구하고 지지력은 비슷한 양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 9, 10, 11에서와 같이 Sand Mat가 포설된 경우에는 같은 침하비의 상태에서 20cm 재하판의 지지력이 10cm의 경우보다 큰 것을 알 수 있다.

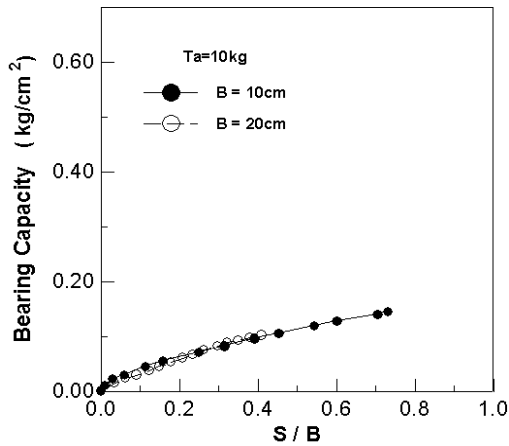


그림 8. Sand Mat가 없을 때의 침하비와 지지력

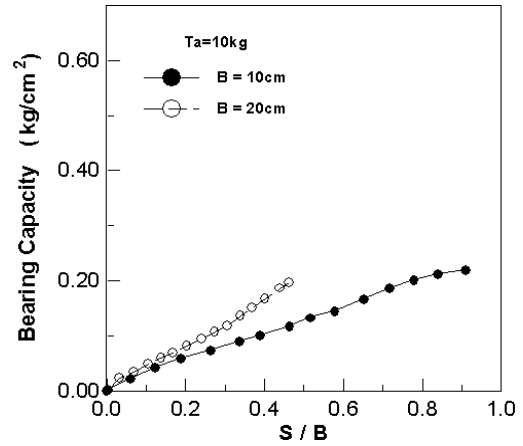


그림 9. Sand Mat가 5cm일 때의 침하비와 지지력

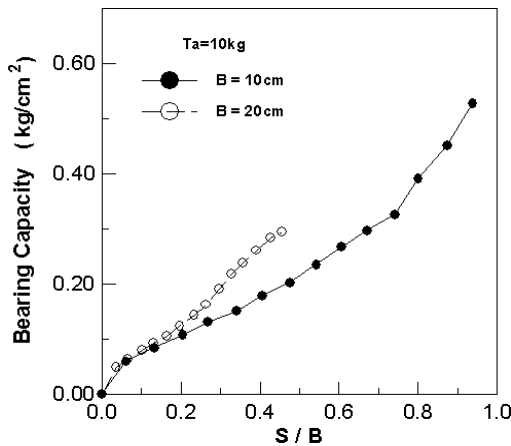


그림 10. Sand Mat가 10cm일 때의 침하비와 지지력

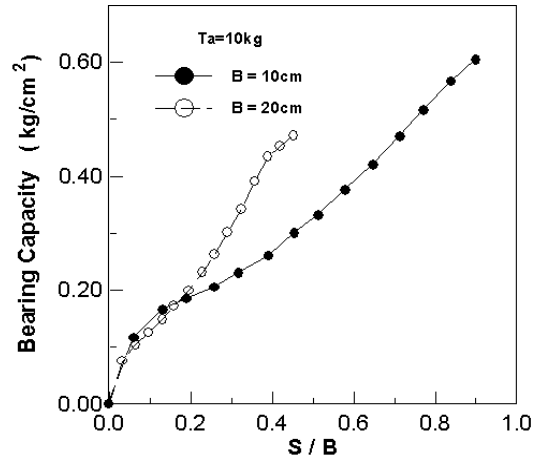


그림 11. Sand Mat가 15cm일 때의 침하비와 지지력

## 5. Sand Mat층의 하중분산효과

### 5.1 Sand Mat층 두께에 따른 하중분산각

실험결과로부터 Sand Mat층 두께에 따른 분산각을 구하는데, 지지력의 기준을 극한지지력이 아닌 침하량 30mm에서의 지지력으로 하였다. Sand Mat층의 두께가 0인 경우에 지지력을  $q_{u-1}$  그리고 Sand Mat층의 두께가 5, 10, 15cm일 때의 지지력을  $q_u$ 로 고려하였으며, 식 (11)를 이용하여 구한 각각의 분산각을 표 5에 나타내었다. 표 5에 의하면 분산각은 재하판의 크기와 Sand Mat층의 깊이에 따라 달라지는 경향을 보였다.

그림 12는 Sand Mat층의 두께에 따른 분산각을 나타낸 것으로, Sand Mat층의 두께가 커질수록 분산각이 커지는 경향을 보였다. 재하판의 폭이 10cm인 경우에는 Sand Mat두께의 비가 0.5, 1.0일 때 Yamanuchi식에서 일률적으로 적용했던  $26.57^\circ$ 보다 작은 값을 보였으며, 두께의 비가 1.5인 경우에는 약간 큰 값을 보였다. 반면에, 재하판의

폭이 20cm인 경우에는  $40^\circ$ 에서  $50^\circ$ 에 이르는 큰 분산각이 얻어졌다.

### 5.2 하중판의 폭에 따른 하중분산각

그림 13은 하중재하폭의 변화에 따른 분산각을 나타낸 것이다. Sand Mat층의 두께에 관계없이 하중재하폭이 20cm인 경우가 10cm인 경우에 비해 큰 분산각을 가졌다. 그리고 분산각이 증가하는 경향이 5cm, 10cm, 15cm의 Sand Mat층의 두께에 있어서 비슷한 경향을 나타내었다.

### 5.3 인장력의 크기에 대한 하중분산각

그림 14는 토목섬유에 가해진 인장력에 따른 하중분산각을 나타낸 것이다. 그림으로부터, 토목섬유에 걸리는 인장력이 10kg일때와 20kg일때를 비교하여 보면 하중분산각의 크기는 크게 차이가 나지 않아 인장력의 크기는 하중분산각에 별다른 영향을 미치지 못하였음을 알 수 있었다.

표 5. Sand Mat층 두께 및 재하판 폭에 따른 하중분산각

TEST. No	하중판 폭 (cm)	Sand층 두께 (cm)	인장력 (kg)	분산각	TEST. No	하중판 폭 (cm)	Sand층 두께 (cm)	인장력 (kg)	분산각
8	10	5	10	7.18°	17	20	5	10	39.21°
9	10	10	10	19.98°	18	20	10	10	49.11°
10	10	15	10	29.93°	19	20	15	10	54.86°

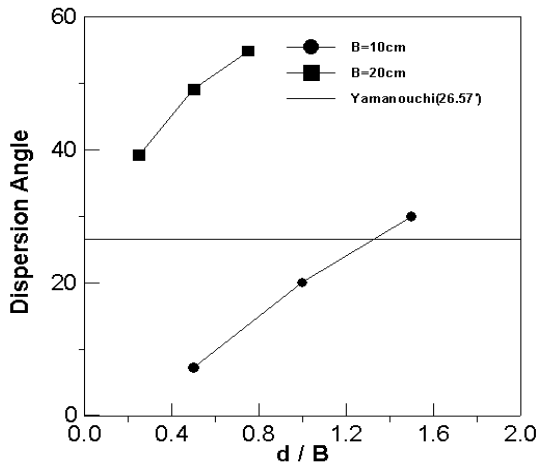


그림 12. Sand Mat층 두께에 따른 하중분산각

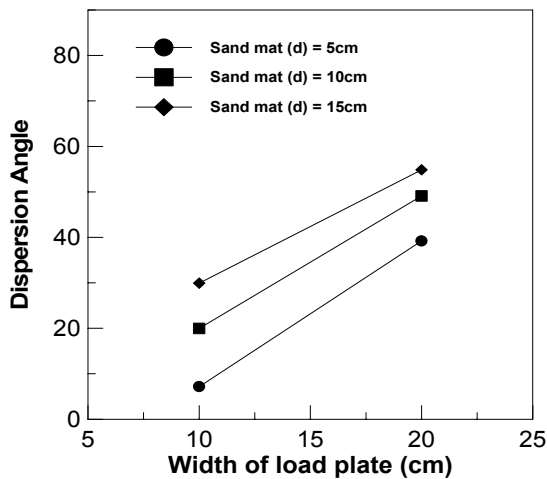


그림 13. 하중판의 폭에 따른 분산각

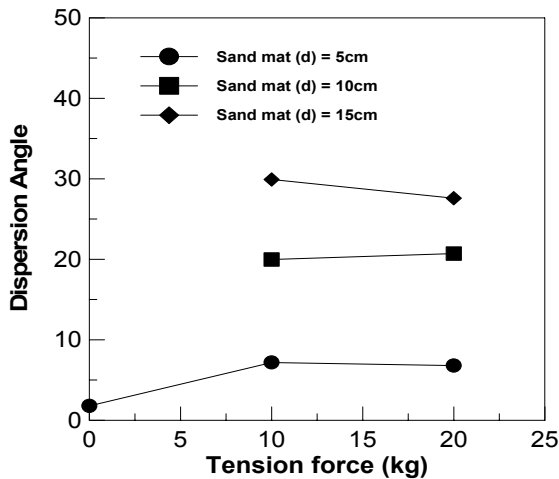


그림 14. 인장력에 따른 분산각

## 6. 결론

토목섬유와 Sand Mat를 이용한 연약지반 보강공법의 설계에 적용되는 Yamanouchi의 제안식을 검토하기 위한 실내모형실험을 실시하였으며 분석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Sand Mat층의 두께와 재하판의 폭이 클수록 큰 지지력을 얻을 수 있었고, 하중분산각 역시 큰 값을 나타냈다.
  2. 재하판의 폭이 10cm인 경우에는 Yamanouchi식에서 일률적으로 적용했던 26.57°보다 작은 하중분산각을 보였으며, 20cm인 경우에는 40°에서 50°에 이르는 큰 분산각이 얻어졌다.
  3. 본 연구에서는 Yamanouchi식을 다음과 같이 수정하여 제안하였으며, 제안한 지지력식은 보강된 연약지반의 지지력을 산정하는 설계에 충분히 반영될 수 있을 것으로 판단된다.
- $$q_u = (1 + \frac{2d \tan \theta_1 - D_f}{B}) [5.3c + T_a (\frac{2 \sin \theta_2}{B} + \frac{1}{r}) + \frac{4S_v R(1 - \cos \theta_2)}{B + 2d \tan \theta_1 - D_f} + \gamma_1 D_f]$$
4. 재하중으로 인하여 토목섬유에서 유발되는 인장력은 하중분산각의 증가에는 큰 영향을 미치지 못하였다.
  5. 향후 보다 큰 규모의 실내실험을 통한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 양기석, 양태선(2003), “준설매립지반에서의 표층처리”, 2003 봄 토목섬유 학술발표회논문집.
2. 주재우 외(2004), “토목섬유-Sand Mat로 보강한 지반의 하중분산각연구”, 2004 대한토목학회 학술발표회논문집.
3. J.W. Ju & M. H. Jang (2004), “Modified Bearing Capacity Equation for Geosynthetics and Sand Mat System”, *Proceeding of the 3rd Asian Resional Conference on Geosynthetics*.
4. T. Yamanouchi (1985), “Recent development in the used synthetic geofabrics and geogrids”, *Symposium on Recent Developements in Ground improvement techniques*, Bangkok, pp.205-224.

(논문접수일 2006. 12. 29, 심사완료일 2007. 3. 2)