

## 토목섬유로 보강된 반원형상의 확대기초의 설계법

### Design Method of Spread Footing of Semicircular Shape Reinforced by Geosynthetics

\*1 주재우 Ju, Jae-Woo

\*2 이승은 Lee, Seung-Eun

\*3 박종범 Park, Jong-Beom

\*4 김기성 Kim, Ki-Seong

#### Abstract

Recently a method for increasing the bearing capacity by laying the reinforcing materials with three or four layers as a method reinforcing the ground was studied recently. The purpose of this study is to examine the method for increasing shear-strength factor of the ground by reinforcing the ground under the foundation. According a method of wrapping ground with bakk-shape or semicircle-shape by geotextile was developed in this study and it looks likes anaspect that spreading footing exits under spread footing. A simulation loading-test using Aluminum sticks was carried out in order to examine the mechanism about bearing capacity of spread footing reinforced by geotextile. Increase of ultimate bearing capacity was verified in this simulation loading-test when charging loads to spread footing, which is propose from this study, reinforced by geotextile. And moving directions of points of the ground were also checked by grid-type indication method, and the areas where plastic failure appeared were checked by B-shutter photographing.

#### 요 지

최근 들어 기초지반 하부를 보강하는 방법으로 4층 또는 5층으로 보강재를 수평으로 배치하여 지지력을 증가시키는 공법이 연구되고 있다. 본 연구에서는 기초하부 지반을 보강함으로써 지반이 갖는 전단강도 정수를 증가시키는 방법을 검토한 것이다. 그래서 지반을 구형 또는 반원형으로 토목섬유를 사용하여 감싸는 공법을 개발하게 되었는데 이는 흡사 확대기초 밑에 또 하나의 확대기초가 존재하는 양상이 된다. 이러한 토목섬유보강 확대기초의 지지력에 대한 메카니즘을 검토하기 위해서 알루미늄봉을 이용한 모형재하시험을 실시하였다. 모형재하시험에서 제안된 토목섬유보강 확대기초를 만들어서 하중을 직접 재하함으로써 극한지지력의 증가정도를 확인하였으며, 또한 격자표시법에 의해 지반의 점들이 이동하는 방향 등을 점검하였고, B-Shutter 촬영법을 이용하여 소성파괴가 일어나는 영역을 확인하였다.

**Keywords** : Geotextile, Aluminum rods, Reinforcement, Foundation

\*1 정희원, 순천대학교 토목환경공학부 교수 (Professor, Dept. of Civil & Eviro. Eng., Univ. of Suncheon National)

\*2 순천대학교 대학원 토목공학과 석사과정졸업 (Graduated Student, Dept. of Civil & Eviro. Eng., Univ. of Suncheon)

\*3 순천대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (Ph.D.Candidate, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Suncheon)

\*4 순천대학교 토목환경공학부 교수 (Professor, Dept. of Civil & Eviro. Eng., Univ. of Suncheon National)

# 1. 서론

옛 성터를 살펴보면 궁궐의 하중을 지지하는 기둥의 하단에 큰 주춧돌이 있었음을 알 수가 있다. 즉 기둥의 단면보다 큰 주춧돌을 놓아서 지반 속으로 하중이 분산 전달되도록 하는 기초공법을 사용한 것이다. 이러한 방법과 유사한 기초 공법이 요즘 확대기초라 말할 수 있다. 확대 기초가 최대한 지지할 수 있는 하중을 극한지지력이라 말하며 보통은 Terzaghi의 지지력식을 이용하여 계산한다. 이때 중요한 인자는 기초의 크기, 기초의 깊이 그리고 기초하부 지반이 갖는 전단강도정수 이다.

본 연구에서는 기초하부 지반을 보강함으로써 지반이 갖는 전단강도 정수를 증가시켜 토목섬유와 흙을 이용하여 확대기초를 형성하는 방법이 소형구조물기초에서 기존의 콘크리트를 이용하여 만드는 확대기초를 대신할 수 있는 것으로 연구결과에 의해 밝혀졌으며, 반원형으로 토목섬유 보강확대기초의 설계법을 제안하였다.

## 2. 보강시 지지력 효과에 대한 이론적 검토

### 2.1 입상토 지반에서 무보강시 지지하중 계산

입상토지반이라 가정하면 극한지지력식은 연속기초의 경우 다음 식 (1)과 같다.

$$q_u = \frac{1}{2} \gamma B N_r + D_f N_q \tag{1}$$

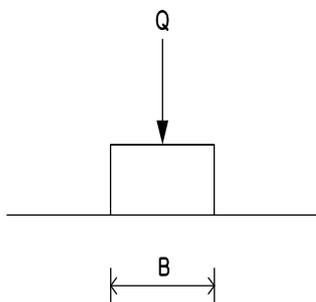


Fig. 1. Unreinforced spread footing

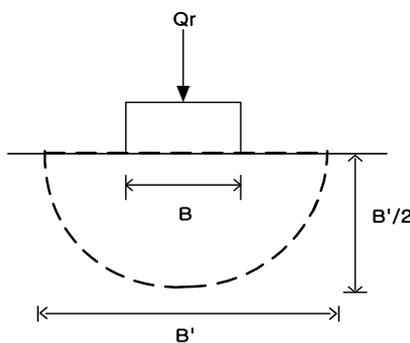


Fig. 2. Semicircle reinforcement form of ground

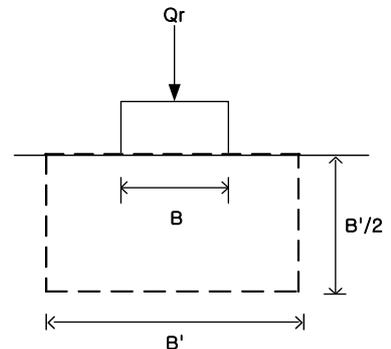


Fig. 3. Rectangle reinforcement form of ground

$D_f=0$ 이면, 극한재하하중은 아래 식과 같이 구한다.

$$Q = q_u(B \times 1) = \frac{1}{2} \gamma B^2 N_r \tag{2}$$

즉, 극한 지지력의 증가에는 기초폭 B가 중요한 역할을 함을 알 수가 있다.

### 2.2 입상토 지반에서 보강시 지지하중 계산

콘크리트 확대기초로 가정하고 식 (1)에서 B는 B'로 가정하며,  $D_f$ 는 B'/2로 가정하여 극한지지력을 계산해 보면 다음 식과 같다.

$$(q_u)_r = \frac{1}{2} \gamma B' N_r + \gamma \left( \frac{1}{2} \right) B' N_q \tag{3}$$

위의 식 (3)을 간단히 정리하면 아래와 같다.

$$(q_u)_r = \frac{1}{2} \gamma B' (N_r + N_q) \tag{4}$$

그리고, 극한 재하하중은

$$Q_r = (q_u)_r (B' \times 1) = \frac{1}{2} \gamma (B')^2 (N_r + N_q) \tag{5}$$

즉 보강효과는 다음 식과 같다.

$$\frac{Q_r}{Q} = \frac{(q_u)_r (B' \times 1)}{(q_u) (B \times 1)} = \left( \frac{B'}{B} \right)^2 \cdot \frac{(N_r + N_q)}{N_r} \tag{6}$$

여기서, 흙재료를 감싸는 보강재의 인장강도 특성

은 아주 중요하다. 보강재의 강도가 클 경우 더욱 보강체의 강성은 증가해서 더 큰 지지력을 발휘하기 될 것이기 때문이다. 그러나 보강재가 파괴가 된다면 지지력 증가 효과는 소멸될 가능성이 있다.

### 3. 모형재하시험장치 및 시험방법

#### 3.1 모형재하시험장치

Fig. 4는 모형시험장치를 나타낸 그림이다. 여기에 사용된 모형 틀은 60cm×40cm×6cm 크기로 제작되었으며, 로드셀(Load cell)과 변위측정장치(LVDT)를 각각 Data logger에 연결하여 20초 간격으로 하중과 변위를 측정하였고 기어박스를 이용하여 수직방향으로 0.3mm/min의 속도로 모형기초지반에 재하하였으며, 파괴메카니즘을 보다 정확히 관찰하기 위하여 모형기초바닥에 알루미늄봉을 일정하게 일렬로 붙여 기초의 거친 조건을 모사하였으며, 모터와 기어박스를 이용하여 기초에 하중을 가하였다.

한편 사질지반을 모사하기 위해 알루미늄봉을 이용하여 모형지반을 제작하였다. 모형지반에 사용된 알루미늄봉 길이는 5cm, 직경 1.6mm, 3.0mm로서 두 종류가 사용되었으며, 중량비 2 : 3의 비율로 혼합함으로써 모형지반을 형성하였다. 모형지반의 건조단위중량은 1.98t/m<sup>3</sup>으로 큰 편이며, 비중은 2.69로서 일반 흙과 거의 비슷하다. 또한 간극비는 0.36이

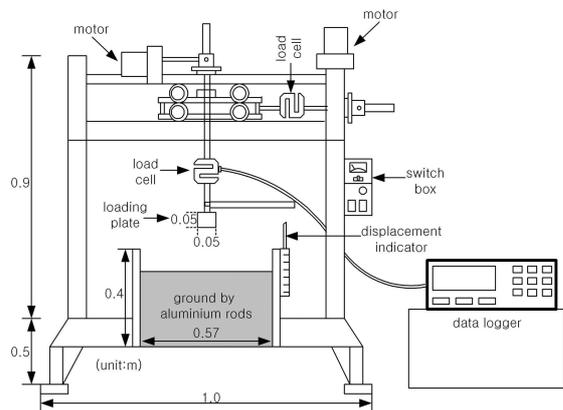


Fig. 4. Model loading test apparatus of using aluminum rods

며, 내부마찰각은 37°로 나타났다. 여기서 마찰각을 산정하는 방법은 여러가지 방법이 있지만 본 실험에서는 Terzaghi 극한지지력식을 이용하여 지지력계수 값을 구하여 마찰각을 산정하였다. 모형지반의 경우  $\phi$ 는 약 37°로 측정되었다.

또한 사용 보강재는 실제 토목섬유를 사용하는 대신 종이 중에서 인장강도가 큰 것으로 알려진 닥종이를 사용하였으며, 인장강도시험을 행한 결과 최대인장강도는 약 2.0kN 이다.

#### 3.2 시험방법

알루미늄봉으로 구성된 지반위에서 지지력 시험을 실시하였으며, 또한 격자표시방법에 의해 지반거동을 관찰하고 B-Shutter 촬영을 이용하여 지반 활동을 관찰하였다.

##### 3.3.1 지지력 시험

무보강에 비해서 보강기초의 지지력증가 효과를 알기 위해서 Fig. 1, 2, 3에 나와 있는 형태로 재하시험을 실시하였는데 재하시험조건은 Table 1에 나타난 바와 같다. 무보강의 기초폭  $B$ 를 5cm로 할 때, 반원형과 구형보강체의 보강체 폭  $B'$ 를 7.5, 10, 15cm로 증가시키며 재하시험을 실시하여 침하에 따른 지지력의 증가를 검토하였다.

Table 1. Model test condition

보강방법	재하판 폭(B)	보강체 폭(B')
무보강	5cm	-
반원형보강	5cm	7.5cm, 10cm, 15cm
구형보강	5cm	7.5cm, 10cm, 15cm

##### 3.3.2 격자표시에 의한 방법

지반의 거동을 관찰하기 위하여 격자를 표시하여 지반의 변형을 관찰하는 방법을 이용하였다. 즉 알루미늄 봉에 의해 제작된 지반에 1cm 간격으로 알루미늄 봉 직경에 색을 칠하였으며, 실험이 진행됨에 따라 봉의 이동 경로를 관찰하였다. 각각 1cm 간격으로 색칠해진 알루미늄봉을 재하판 중심 왼쪽으로부터

터 가로14×세로13으로 배치하여 시험이 진행됨에 따라 봉의 이동경로를 관찰하였다.

### 3.3.3 B-Shutter 방법

재하시험 도중 사진을 촬영 할 때 B-Shutter 방법을 이용하였다. B-Shutter 촬영법이란 B로 표시된 셔터로 셔터 릴리즈가 작동하는 동안 셔터가 계속 열린 채로 사진을 촬영하는 방법을 말한다. 즉 처음 하중을 재하한 순간에 셔터 릴리즈를 열어놓고 사진촬영을 하면 알루미늄 봉으로 구성된 지반의 움직임이 사진에 포착되어 활동영역을 확인할 수 있다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 재하시험결과

#### 4.1.1 반원형 보강시 재하시험결과

Fig. 5는 보강체의 형상이 반원형일 경우 침하에 따른 하중의 증가를 표시한 것이며, 보강의 폭을 재하판 폭 B의 1.5배, 2배, 3배로 했을 때의 변화를 나타낸 그림이다. 무보강의 경우 침하와 더불어 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며, 반원형으로 지반을 보강한 경우는 보강체 폭이 증가함에 따라 재하하중이 증가하는 경향을 나타내었다

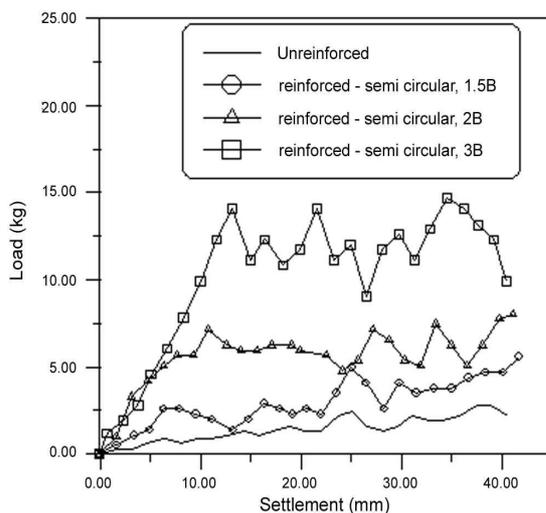


Fig. 5. Semicircle type reinforcement

#### 4.1.2 구형 보강시 재하시험결과

Fig. 6은 구형으로 보강한 경우며, 재하판 폭B의 1.5배, 2배, 3배로 했을 경우 침하에 따른 하중증가를 나타낸 것이다. 반원형의 경우와 마찬가지로 구형보강의 경우에도 상당히 큰 보강 효과를 보이고 있음을 알 수가 있다. 그러나 보강체의 폭이 3B인 경우에는 10mm 근처에서 최대 피크를 보인 후 급격히 지지하중이 감소했다가 결국은 무보강의 경우와 거의 비슷한 값으로 변해 감을 알 수가 있다. 이는 보강재가 파단되어 발생하는 메카니즘을 잘 나타내 주는 것이며, 지지력이 점차 증가하다가 보강재가 파단이 되면 보강효과는 급격히 저하한다는 사실을 보여주고 있다.

#### 4.1.3 이론적 보강효과와 시험결과와 비교

보강체를 강성으로 가정할 경우 이론적으로 보강효과를 나타내는 식은 (6)으로 제안한 바가 있으며 그 식은 아래와 같다.

$$\frac{Q_r}{Q} = \frac{(q_u)_r(B' \times 1)}{(q_u)(B \times 1)} = \left(\frac{B'}{B}\right)^2 \cdot \frac{(N_r + N_q)}{N_r} \quad (6)$$

위 식을 보면 보강효과는 토목섬유로 감싼 보강토체의 폭 B'의 크기에 연관되어 있음을 알 수가 있다.

Fig. 7은 시험적 보강효과를 이론적 계산값과 비교 검토 한 것이다. 먼저 실선의 값은 완전 강성체에

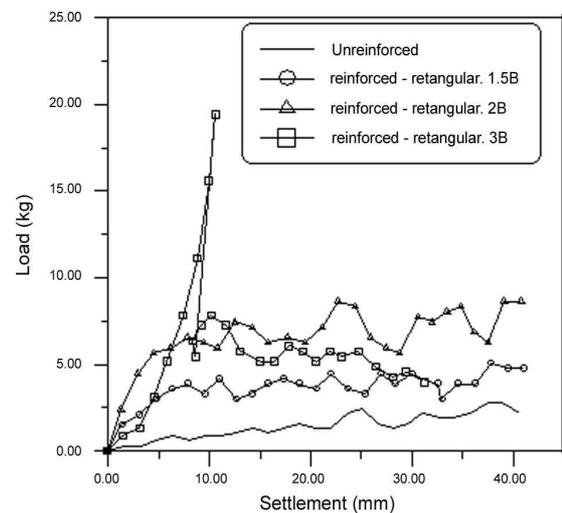


Fig. 6. Reinforced-retangular

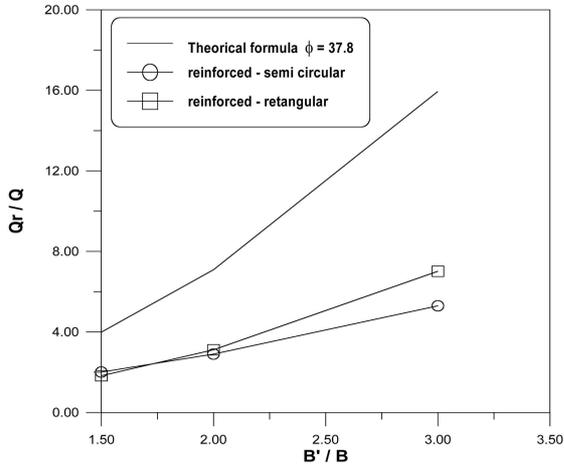


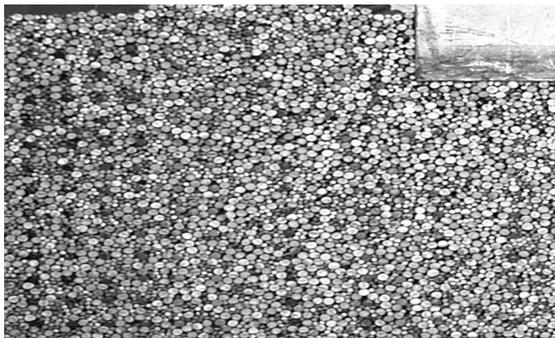
Fig. 7. Comparison between theoretical value and test results

대한 이론 식 (6)을 이용하여 계산된 것으로 만약 보강재로 감싼 보강체가 강성이 최대한 커진다면 얻을 수 있을 것으로 예측되는 보강효과라 말할 수 있다. 반원형 보강체와 구형 보강체를 비교할 경우 비슷한 보강효과를 보이거나 3B에서는 구형 보강체가 더 큰 보강효과를 보이는 것을 알 수가 있다. 그 이유는 구형 보강체의 체적이 반원형 보강체에 비해 크기 때문

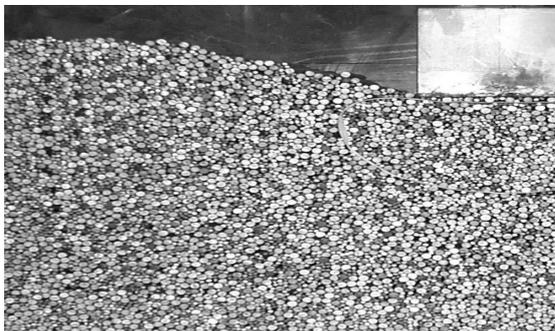
에 기초 깊이로 인한 효과를 확실히 발휘했기 때문으로 나타났다. 보강체들의 보강효과는 대략 완전 강성체의 경우와 비교하여 대략 1/2 정도의 보강효과를 나타남을 확인하였다. 그러나 보강재의 강도가 커진다면 보강효과는 더욱 커질 것이라는 예측이 가능하다.

#### 4.2 격자표시방법에 의한 지반거동 관찰

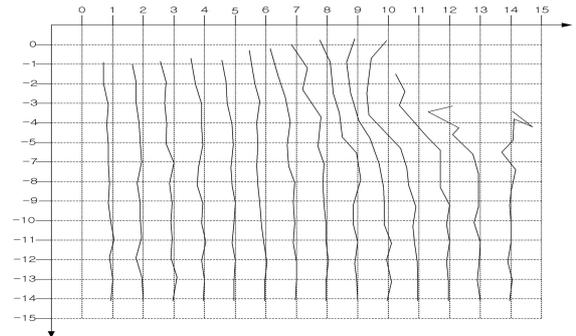
Fig. 8에서 (a),(b)는 무보강 상태의 알루미늄봉으로 만든 모형지반에 재하 시험결과를 나타낸 것이다. 1cm 격자로 색칠해진 알루미늄 봉이 이동해 있는 것을 명확하게 볼 수가 있다. Fig. 8의 (b)는 이동한 알루미늄 봉들의 경로를 표시한 것이며, Fig. 8의 (c), (d)는 반원형으로 보강된 지반의 하중 재하에 따른 지반의 이동을 나타낸 것이다. 무보강일때는 재하관 하부근처에 있는 지반만이 좌측 상부방향으로 이동했으며, 활동영역이 크게 나타나고 있지 않지만, 반원형으로 보강된 지반의 경우는 활동이 매우 깊은 지반까지 영향을 미치며 하부에서 좌측상부방향으로 움직였음을 관찰할 수 있었다.



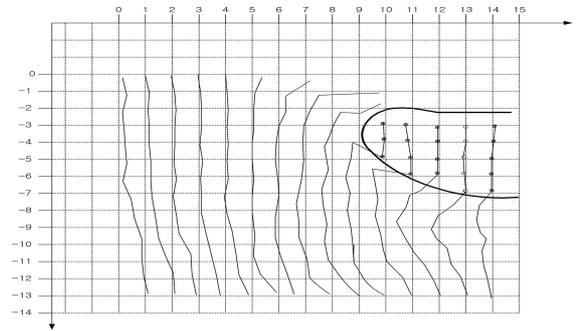
(a) Unreinforced (S=0~35.7mm)



(c) Reinforced (S=0~20.8mm)



(b) B'=10cm, S=0~35.7mm



(d) B'=10cm, S=0~20.8mm

Fig. 8. Movement of ground made by aluminum rods

#### 4.3 B-Shutter 촬영법에 의한 활동영역 관찰

Fig. 9의 (a), (b)는 무보강 상태에서 지반이 파괴되어 이동하는 모습을 B-Shutter촬영을 하고 그린 그림이며, 전형적인 연속기초의 파괴형상과 비슷한 모습을 나타내고있다. 또한 Fig. 9의 (c), (d)는 반원형으로 보강한 지반에 대한 파괴형상을 B-Shutter 촬영을 한 것이다. 파괴형상은 무보강의 경우와 유사하지만 반원형보강체로 인하여 매우 깊고 넓게 지반의 움직임이 나타나고 있다. 지반의 활동영역이 커진다는 것은 극한지지력이 커진다는 것을 나타낸다. 즉 기초의 보강방법이 극한지지력을 증가시키는 공법으로 사용될 수 있음을 확인 할 수 있었다.

#### 5. 토목섬유 보강확대기초 설계법 제안

Fig. 10의 (a)는 무보강의 경우를 나타낸 것이며, (b)는 반원형으로 보강된 기초의 형상을 나타낸 것이다. 무보강 연속기초인 경우,  $\phi$ 만이 존재하는 입상 토라 가정했을 때 극한지지력은 아래 (7)식 과 같다.

$$(q_u)_N = \frac{1}{2} \sqrt[3]{BN_r} \quad (7)$$

안전율을 계산에 사용되는 접지압은 아래 식 (8)과 같다. 따라서 무보강시의 안전율은 (9) 식으로 계산 되어진다.

$$\sigma_N = \frac{Q}{B \times 1} \quad (8)$$

$$(F_s)_N = \frac{(q_u)_N}{\sigma_N} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt[3]{BN_r}}{\frac{Q}{B}} = \frac{\sqrt[3]{B^2 N_r}}{2Q} \quad (9)$$

반원형으로 보강했을 경우 극한지지력을 구하는 방법으로 구형 콘크리트기초로 가정하여 구한 극한 지지력의 2/3를 반원형기초의 극한지지력이라 가정한다면 직경  $B'$ 가 기초 폭이 되고 직경 절반인  $B'/2$ 가 기초의 깊이로 가정되는 기초를 말한다. 즉 구형 콘크리트기초의 극한지지력은 아래 식과 같다.

$$(q_u)_r = \frac{1}{2} r B' (N_r + N_q) \quad (10)$$

따라서, 반원형보강기초의 경우는 대략 면적의 크기와 관련지어 (10)에서 구한 값의 2/3 값을 취하는

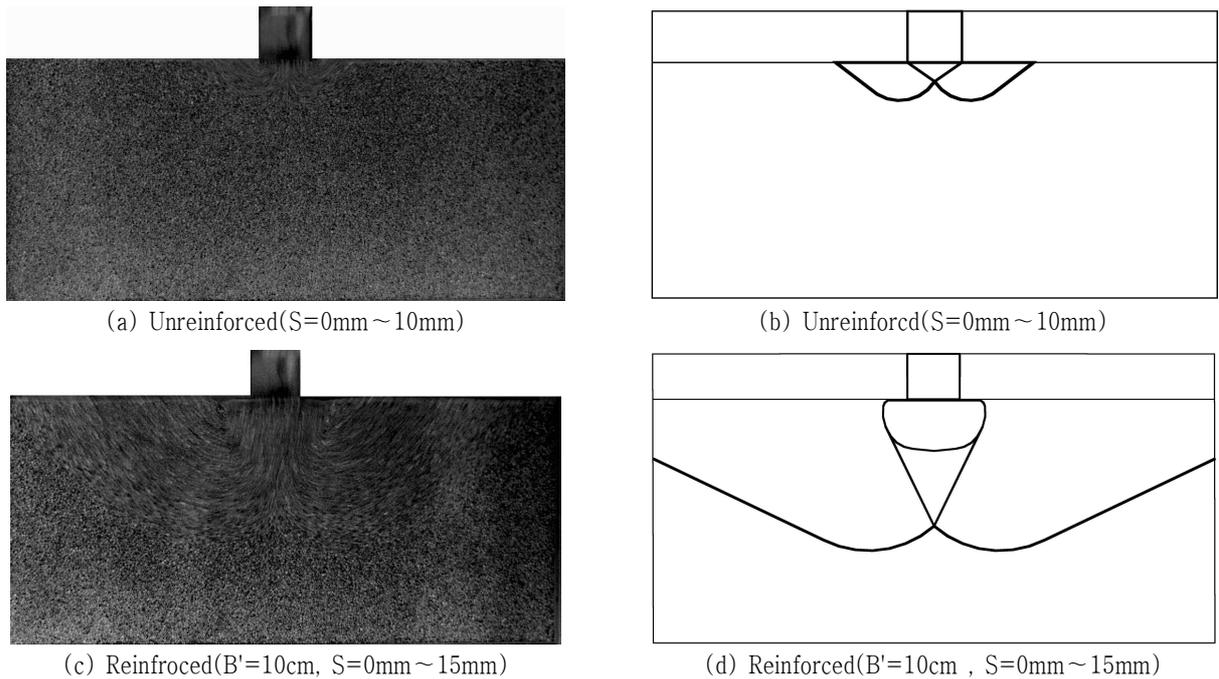


Fig. 9. Failure Shape of foundation made by aluminum rods using B-Shutter photography

것으로 가정하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$(q_u)_r = \frac{1}{3} r B'(N_r + N_q) \quad (11)$$

여기서, 극한지지력은 완전강체라 가정하여 계산되었지만 Fig. 10의 모형시험결과를 보면 대략 토목섬유로 감싸서 보강한 경우는 이론적 극한지지력의 1/2정도 됨을 알았다. 따라서 식 (11)을 다음 식으로 수정한다.

$$\begin{aligned} (q_u)_r &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{3} \gamma B'(N_r + N_q) \right] \\ &= \frac{1}{6} \gamma B'(N_r + N_q) \end{aligned} \quad (12)$$

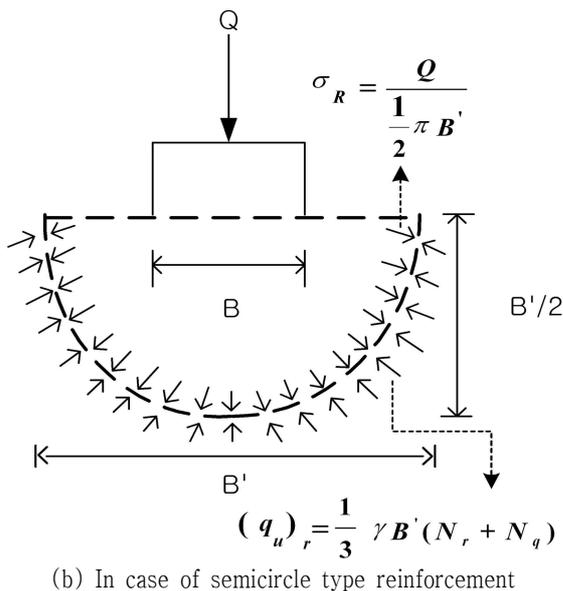
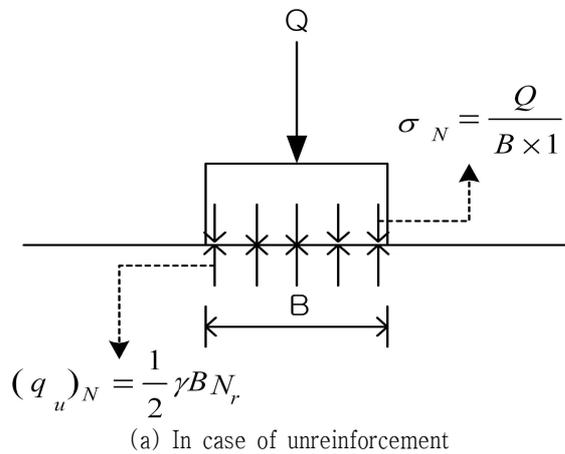


Fig. 10. type reinforcement of foundation ground

반원형보강기초의 경우 접지압의 계산은 Fig. 10 (b)에 나타낸바와 같이 반원전체에 걸쳐 고루 분포되는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 접지압은 다음식 (13)로 나타내어 진다.

$$\sigma_R = \frac{2Q}{\pi B'} \quad (13)$$

따라서, 반원형으로 보강된 기초지반의 지지력에 대한 안전율을 식으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} (F_s)_R &= \frac{(q_u)_r}{\sigma_R} = \frac{\frac{1}{6} \gamma B'(N_r + N_q)}{\frac{2Q}{\pi B'}} \\ &= \frac{\gamma \pi (B')^2 (N_r + N_q)}{12Q} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $(F_s)_R$ 이 3이라 할 경우 다음 식을 이용하여 보강체의 폭  $B'$ 를 구할 수 있다.

$$B' = \sqrt{\frac{12Q(F_s)_R}{\pi \gamma (N_r + N_q)}} \quad \text{단, } (B' > B) \quad (15)$$

기초지반이 받아야할 하중  $Q$ 를 무보강지반의 안전율을 구하는 식 (9)에서 계산했을 때 소정의 안전율을 갖지 못한다면 반원형확대기초를 사용하여 확대기초의 폭을 조정함으로써 소정의 안전율을 갖는 기초의 설계가 가능할 것이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 토목섬유로 보강된 반원형상의 확대기초, 즉 지반을 반원형으로 감싸서 지반을 보강하는 방법에 대한 모형시험을 실시하였으며 시험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 보강체들의 보강효과는 대략 완전 강성체의 경우와 비교하여 대략 1/2 정도의 보강효과를 보였다.
2. 지반거동의 관측에서 무보강일때는 재하판의 하부근처에 있는 지반이 좌측 상부방향으로 움직였으며 활동영역의 크기는 매우 작다. 그러나 반원형으로 보강된 지반의 경우는 활동이 매우 깊은

지반까지 영향을 미치며 하부에서 좌측상부방향으로 움직였음을 관찰 할 수 있었다.

3. 보강체들의 보강효과는 대략 완전 강성체의 경우와 비교하여 대략 1/2 정도의 보강효과를 보였다.
4. 하중재하과정에서 B-Shutter 촬영결과를 보면, 파괴형상은 무보강의 경우에 비해 반원형 보강체의 경우 매우 깊고 넓게 지반의 이동 활동영역이 매우 커졌음이 관측되었다. 따라서 극한지지력이 매우 커졌음을 알 수가 있었다. 즉 이러한 지반의 이동영역의 크나큰 확대는 본 기초의 보강방법이 극한지지력을 증가시키는 공법으로 사용될 수 있음을 확인하는 것이다.
5. 토목섬유 보강확대기초의 설계법을 제안 하였다. 단, 본 설계는 확대기초 하부기초지반을 토목섬유 확대기초를 이용하여 보강하는 것으로 한정 했으며 또한 여기서는 입상토지반을 대상으로 하여 토목섬유로 보강된 반원형상의 확대기초 폭을 구하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$B' = \sqrt{\frac{12Q(F_s)_R}{\pi\gamma(N_r + N_q)}} \quad \text{단, } (F_s)_N = \frac{\gamma B^2 N_r}{2Q} < 3$$

시험 결과 지지력의 증가효과가 큰 것으로 밝혀졌으며, 임시구조물의 기초설계 또는 경량구조물의 기초설계에서 본 연구에서 행한 보강재를 이용한 확대기초 형성 방법이 사용될 수 있으리라 판단된다.

1. 박준형, “비점착성 사면에 근접한 기초의 거동에 관한 연구”, 계명대학교 석사학위논문, 1999.
2. 양기철, “기초지반의 진행성 파괴거동에 대한 분석 및 연구”, 전주대학교 석사학위 논문, 2000.
3. 주재우, 이승은, 서계원, 2001, “보강재를 이용한 확대 기초형성 보강방법 연구”, 대한토목학회 2001년도 학술발표회 논문집.
4. 주재우, 이승은, 서계원, 최현기, 2002, “토목섬유를 이용한 확대 기초의 설계법 연구”, 한국지반공학회 2002 가을학술발표회 논문집.
5. Braja M. DAS, “Principle of geotechnical engineering”, PWS Engineering.
6. Braja M. DAS, “Principle of foundation engineering”, PWS Engineering.
7. J.Otani & K.Yamamoto, “Experimental study on localized deformation behavior of reinforced foundation ground”, Kumamoto University, Japan.
8. Kentaro Yamamoto & Koji Kusuda, “Failure mechanic and bearing capacities of reinforced foundations”, Geotextiles and Geomembranes (2001), 127-162.
9. K.Yamamoto & J.Otani, “Localized deformation analysis of reinforced foundation round”, Kumamoto University, Japan.
10. T.William Lambe, Rovert V.Whitman, “Soil Mechanics”, SI Version.