

KGS FALL '94 National Conference
28, 29 October, 1994/Seoul/Korea

지오그리드로 보강된 연약지반 위에 위치한 연속기초의 극한 지지력
Bearing Capacity of Strip Footing on Geogrid-Reinforced Soft Ground

유 충 식, Chung-Sik Yoo*

신 승 우, Seung-Woo Shin**

* 성균관대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan Univ., Seoul
**성균관대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Sung Kyun Kwan Univ., Seoul

SYNOPSIS: This paper presents the results of a parametric study on the bearing capacity behavior of a footing located above geogrid-reinforced ground using the finite element method of analysis. A wide range of boundary conditions were analyzed, with varying geogrid design parameters such as depth of geogrid layer, length and stiffness of geogrid, and number of geogrid layers, were analyzed. Based on the results of analysis, the optimum geogrid design parameters were determined, which maximize the reinforcing effect of geogrid reinforcement for a given condition. Furthermore, the mechanistic behavior of a geogrid-reinforced ground subjected to a footing load was discussed using the results of analysis such as stress distribution, propagation of plastic yielding, displacement vector among others.

1. 서 론

국내에서도 그 이용도가 점차 증가하고 있는 지오그리드는 선진 외국에서 토목구조물의 보강재로서 매우 활발히 사용되고 있는 토목섬유의 일종으로, 폴리에틸렌이나 폴리프로필렌을 압축한 쉬트를 세로 또는 가로와 세로 방향으로 인장 시킴으로써 만들어지며 용접부나 연결 취약부가 없는 격자 구조로 되어있다. 지오그리드의 기능 및 효과로는 인장보강기능, 분리기능, 배수여과기능, 상호결속기능 등을 들 수 있으며 제방기초, 도로 기층과 표층, 철도 도상의 보강, 그리고 토벽 및 사면 보강에 매우 효율적으로 사용되고있다.

지오그리드나 지오텍스타일 등의 토목섬유로 기초지반을 보강할 경우 지반의 지지력 증가 정도는 토목섬유의 포설방법에 따라 결정된다. 따라서 안전하고 경제적인 설계를 위해서는 토목섬유의 포설방법에 따른 보강지반의 지지력 변화특성 및 역학적 거동특성의 근본적인 이해가 선행되어야 한다. 이러한 연구의 필요성에 부응하여 외국에서는 기초의 지지력을 증가시키는 목적으로 사용되는 토목섬유에 대한 연구가 지오텍스타일을 대상으로 수행되어왔으며, 최근에 들어 지오그리드를 대상으로한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 지반 보강용 토목섬유에 대한 연구가 극히 부진하며, 설계치침 또한 제대로 제시되어 있지 않고 있어 과다설계 혹은 위험한 설계가 될 소지가 다분하며, 향후 건설시장이 개방될 경우 이에 따른 경쟁력 저하가 우려되므로 이에 대한 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

지오그리드를 비롯한 토목섬유로 보강된 지반의 지지력에 관한 연구는 모형기초실험이나 한계상태해석(limit analysis), 또는 유한요소해석 등의 수치해석으로 수행 가능하다. 그러나 모형기초실험을 수행할 경우 size effect로 인한 오차를 줄이기 위해서는 충분히 큰 기초를 대상으로 full scale 실험을 수행 하여야 함에 따른 경제적인 어려움이 있다. 또한 한계상태해석은 파괴면의 형상 및 위치에 대한 정확한 예측이 가능하여야만 어느 정도 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있으나 보강지반의 경우 이에 대한 정확한 예측이 매우 어려울 뿐더러 다양한 조건을 해석하여야하는 본 연구에는 적합하지 않은 방법이다. 한편 유한요소해석은 지반과 지오그리드의 모델화가 용이하고 지반의 용력-변형 거동, 지반의 소성전파형상 그리고 지오그리드내의 인장력 분포 등의 해석결과로부터 보강지반의 총체적 거동의 고찰이 가능하다는 잇점이 있으며, 또한 이미 토목섬유를 이용한 보강토목구조물의 해석에서 그 유용성이 입증된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 보강지반의

지지력 변화 특성에 대하여 알아보고자 탄소성 유한요소해석을 이용한 수치실험적 기법으로 지오그리드의 포설깊이(depth), 포설층의 수(number of geogrid layers), 포설길이(length), 그리고 지오그리드의 강성(stiffness) 등의 설계변수들에 따른 보강지반의 지지력 변화 특성을 정성, 정량적으로 분석하고 그 결과를 토대로 보강지반 설계에 필요한 기본적인 지침을 제시하였다. 아울러 보강지반의 역학적 거동 특성에 관해 알아보았다.

2. 지오그리드로 보강된 지반의 거동에 관한 이론적 고찰.

지오그리드를 지반에 포설할 경우 지오그리드는 지반의 소성파괴 방지, 수평 전단저항강화 및 지반의 강성증대 등의 효과를 통해서 지반의 지지력을 향상시킨다. 이는 무근 콘크리트에 철근을 첨가함으로써 인장보강효과를 얻는 것과 같은 맥락에서 설명될 수 있다. 즉 그림 1a에서 보이는 것과 같이 반 무한 토체內의 한 요소에 수직응력이 작용할 경우 토체는 횡방향으로 변형을 일으키는데 이를 억제하기 위해서는 수평방향 응력이 작용해야한다. 지오그리드로 보강된 토체는 흙이 변형을 일으킬때 따라 지오그리드가 인장저항력을 발휘하게 되고 이러한 인장저항력은 추가 수평방향 응력으로 작용하게되어 토체內에 횡방향 변형이 일어나는 것을 억제하는 효과를 얻게 된다.

이러한 지오그리드의 보강효과는 Schlosser 등(1974)이 제안한 등가점착력의 개념으로서도 설명되어질 수 있다. 이 이론은 사질토체內에 보강재가 수평으로 설치될 경우 토체의 강도가 증가하게 되는 것은 지오그리드의 인장저항력이 토체의 점착력을 증가시키는 것과 같은 효과를 가져오기 때문이라는 개념에 바탕을 두고 있으며, 토압이론을 적용하여 등가점착력에 관한 표현을 유도하였다. 그림 1b에서 보이는 보강토체의 최소주응력은 식 (1)과 같이 표현되며, 다시 식(1)에 수동 토압계수 K_p 를 곱함으로써 최대주응력에 관한 식 (2)를 얻는다.

$$\sigma_{3R} = \sigma_3 + \Delta\sigma_3 \quad (1)$$

$$\sigma_{1R} = K_p \sigma_{3R} = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) K_p \quad (2)$$

여기서 σ_{3R} 과 σ_3 은 각각 보강토체와 비보강토체의 최소 주응력이며, $\Delta\sigma_3$ 는 보강재로 인한 최소 주응력 증가분이다. 또한 흙의 수평방향 변

형이 보강재의 변형과 같다고 가정할 경우, 보강재의 인장저항력은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 이용해 식 (2)는 다시 식 (4)와 같이 표현된다.

$$T = \Delta\sigma_3 \Delta H \quad (3)$$

$$\sigma_{1R} = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3)K_p = \sigma_3 K_p + (T/\Delta H)K_p \quad (4)$$

여기서 ΔH 는 보강재의 수직간격이다. 한편 Rankine의 주동상태를 고려하면 보강토체의 최대주응력은 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{1R} = \sigma_3 K_p + 2C_{uR} \sqrt{K_p} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 비교하면 등가점착력 C_{uR} 은 식 (6)과 같이 유도된다.

$$C_{uR} = \frac{T_D \sqrt{K_p}}{2\Delta H} \quad (6)$$

여기서 T_D 는 보강재의 단위폭당 파괴시 인장저항력(인장강도)이다. 따라서 보강지반은 보강재의 첨가로 인해 식 (6)으로 주어지는 등가점착력을 갖게 된다고 생각할 수 있으며, 지반의 강도 증가 정도는 보강재의 인장강도에 비례함을 알 수 있다.

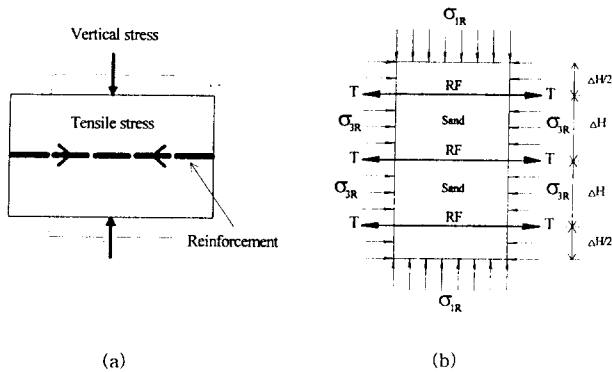


그림 1. 지오그리드의 보강 메카니즘

3. 유한요소해석

보강된 지반의 지지력 거동특성을 정확히 예측하기 위해서는 기초 하중의 작용에 따른 보강지반의 응력-변형 관계를 효율적으로 모사할 수 있는 정확한 해석기법이 필요하다. 본 연구에서는 Duncan 등이 제안한 Hyperbolic 모델과 Drucker-Prager 항복기준을 토대로 지반의 비선형 탄소성 거동을 모사하는 유한요소해석 프로그램 GEOFE3D를 이용하여 보강지반을 해석하였다. Yoo(1993)에 의해 개발된 GEOFE3D는 2차원 및 3차원 해석이 가능하고 일반적인 지반공학문제 해석에 사용될 수 있는 지반공학 범용 프로그램으로 선·후처리 시스템을 통한 유한요소망의 자동생성 및 해석결과의 가시화 기능을 포함하며, 모형기초실험 결과와의 비교를 통해 알고리즘의 타당성이 입증된 바 있다. GEOFE3D에 대한 자세한 사항은 참고문헌 (10)에서 찾아 볼 수 있다.

유한요소해석을 통한 보강 토류구조물의 거동해석 결과는 지반과 보강재의 상호작용에 관한 모델링 방법에 의해 크게 좌우된다. 일반적으로 지반과 보강재의 상호작용에 관한 모델링 방법은 두가지로 나누어지는데 하나는 흙과 보강재를 개별적으로 모델링하는 방법이고, 다른 하나는 보강재와 주변의 흙을 하나의 단일화된 복합재료 (composite material)로 모델링하는 방법이다.

복합재료에 의한 모델링 기법은 앞서 언급한 등가점착력 개념에 입각한 것으로 Otani 등(1994)에 의해 제안되었으나 아직 그 타당성이 입증되지 않았으며, 또한 보강재가 받는 인장력을 계산할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 흙과 보강재를 개별적으로 모델링하는 기법을 채택하였으며, 이를 위해 GEOFE3D에 추가로 1차원 봉요소(one dimensional bar element)를 첨가하여 지반에 포함된 지오그리드의 모델링이 가능하게 하였다.

보강지반의 응력-변형 거동은 서로 다른 재질을 가진 흙과 보강재 사이의 접촉거동에 의해 많은 영향을 받을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Desai 등(1984)에 의해 개발된 4절점 접촉요소(interface element)개념을 도입하여, 흙과 보강재사이에 접촉요소를 첨가하여 흙과 보강재의 상대적인 움직임(relative movement)에 의한 접촉거동(interfacial behavior)을 모사 하도록 하였다. 본(main) 해석을 실시하기전에 예비해석을 수행하여 접촉요소가 보강지반의 지지력에 미치는 영향을 알아본 결과 아주 적은 영향을 주는 것으로 판단되어 본 연구를 위한 유한요소해석에서는 접촉요소를 사용하지 않았다. 이러한 경향은 하중의 기하적 조건(수직하중)이 그다지 큰 수평변위를 일으키지 않아 접촉요소의 사용여부가 해석결과에 큰 영향을 미치지 않기 때문으로 사료된다.

본 연구에서 대상으로한 기초는 1.0m의 폭을 갖는 연속기초이며, 따라서 2차원 평면변형 유한요소해석을 수행하였다. 기초-지반 시스템을 離散化하는 과정에 있어서 지반과 콘크리트기초에 대해서는 4개의 절점을 갖는 4변형 요소를, 그리고 지오그리드에 대해서는 2절점 봉요소를 사용하였다. 그림 2는 해석에서 사용된 454개의 4변형 요소와 18개의 봉요소로 이산된 유한요소망을 보여주고있으며 유한요소망의 측면과 하단부에 인위적으로 설치된 경계면은 예비 해석 (preliminary analysis)을 수행하여 해석의 결과에 영향을 미치지 않는 지점에 설치하였다. 본 연구에서는 초기탄성계수 $E_s=2500$ kPa, 단위중량 $\gamma=14$ kN/m³, 비배수 전단강도 $c_u=11$ kPa, 포아송비 $\nu=0.48$ 의 물성치를 갖는 연약점토지반을 대상으로 하였으며, 다양한 강성의 지오그리드를 고려하기위해 지오그리드의 강성(stiffness, J)을 $J=500$ kN/m, 1000 kN/m, 1500 kN/m, 2000 kN/m으로 변화 시키며 해석을 수행하였다.

그림 3은 유한요소해석으로부터 얻어진 지오그리드의 포설깊이 (u/B)에 따른 하중-침하 곡선의 변화 경향을 보여 준다. 보이는 바와 같이 지오그리드의 보강효과는 지오그리드의 포설깊이에 따라 많은 차이를 보이며, 이는 주어진 시공조건에서 지오그리드의 포설방법에 따라 보강지반의 지지력이 많은 차이를 보일 수 있음을 말해준다. 따라서 지오그리드로 지반을 보강할 경우 최대 보강효과를 얻기 위해서는 지오그리드의 각종 설계조건을 최적화하는 과정이 필요함을 보여주고 있다. 본 연구에서는 이러한 최적설계를 위한 기초를 설정하고자 지오그리드의 포설깊이(u), 길이(L), 포설층수(N), 그리고 강성(Stiffness, J) 등의 설계변수를 대상으로 수치실험적 매개변수 변환연구를 수행하였다. 그림 4는 본 연구에서 사용된 실험과 함께 지오그리드로 보강된 지반위에 위치한 기초의 개략도를 보여주고있다.

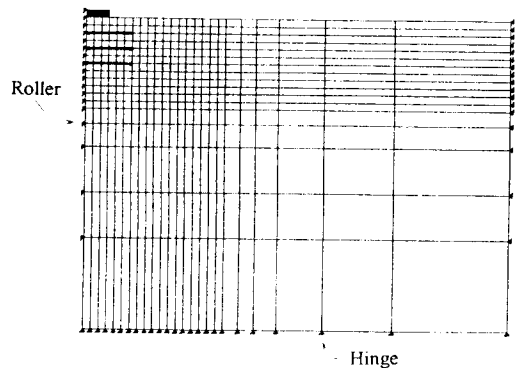


그림 2. 해석에 사용된 유한요소망

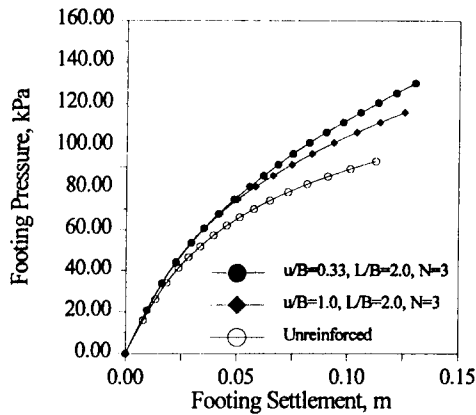


그림 3. 지오그리드의 포설깊이에 따른 하중-침하 곡선 변화 경향

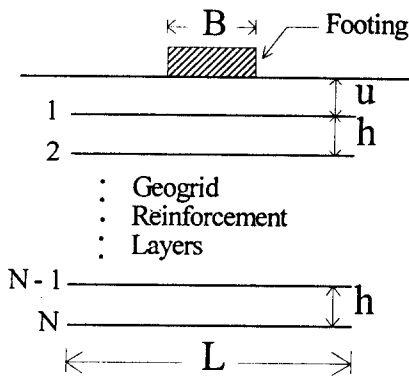


그림 4. 보강지반의 개략도

4. 결과 분석 및 고찰

보강지반의 극한지지력은 유한요소해석으로부터 얻어지는 하중-침하 곡선을 사용하여 결정하였다. 극한지지력을 결정하는데 있어서 객관성을 유지하고자 과도한 기초의 침하를 시스템 파괴로 규정하는 한계 침하(critical settlement) 개념을 도입하여 기초폭(B)의 10%에 해당하는 침하를 유발시키는 기초하중을 극한지지력으로 결정하는 방법을 사용하였다. 또한 이러한 방법으로 결정된 보강지반의 지지력(q_{ur})을 다시 비보강지반의 지지력(q_u)으로 표준화시켜, 이로부터 얻어진 지지력 비율(Bearing Capacity Ratio, $BCR = \frac{q_{ur}}{q_u}$)을 사용하여 보강지반의 지지력과 설계변수들의 상관관계를 알아보았다.

4.1 설계변수들에 따른 지지력의 변화 경향

지오그리드의 포설깊이(u/B)가 보강지반의 지지력에 미치는 영향을 알아 보기 위하여 포설깊이와 포설층수를 각각 $L/B=2.0$, $N=3$ 으로 고정시키고 포설깊이를 16.7cm($u/B=0.167$), 33.3cm($u/B=0.33$), 50cm($u/B=0.5$), 66.7cm($u/B=0.67$)로 변화시키며 해석을 수행하였다. 그림 5에서 보이는 바와 같이 BCR은 $u/B=0.33$ 일 경우 최대 값에 도달한 후, u/B 가 증가함에 따라 감소하는 추세를 보여 $u/B \geq 1.6$ 인 경우에는 BCR이 1.0에 접근하는 경향을 보인다. 이러한 결과로부터 최적포설깊이는 $(u/B)_{op}=0.33$ 임을 알 수 있으며, 현장문제에 적용시킬 경우 u/B 를 0.2~0.5로 유지함으로써 최대의 보강효과를 얻을 수 있다.

처음에 보였던 u/B 의 증가에 따른 BCR 증가경향은 지오그리드가 깊게 포설 됨에 따른 구속력 증가에 의해 인장보강효과가 향상되었음을 반영하며, $(u/B)_{op}$ 이후의 BCR 감소 경향은 지오그리드의 위치가 기초하중의 영향영역(전단영역)에서 벗어남에 따른 것으로 사료된다. 이러한 결과는 또한 다층(多層)의 지오그리드를 중첩배치시켜 지반을 보강할 경우 마지막 층의 위치가 기초의 저면으로부터 $1.6B$ 이내에 위치하도록 설계하여야 그 층으로부터 보강효과를 얻을 수 있음을 말해준다.

지오그리드의 포설길이(L)에 따른 지지력의 변화 양상을 고찰하기 위해 포설깊이를 $(u/B)_{op}$ 에 고정시키고 L/B 를 변화시키면서 유한요소 해석을 수행하였으며 그 결과는 그림 6에 나타나 있다. 보이는 바와 같이 L/B 가 증가함에 따라 BCR 또한 선형적으로 증가하는 경향을 보이다가 $L/B \geq 2.0$ 인 경우에는 일정한 값의 BCR을 보이고 있어 최적포설길이는 $(L/B)_{op}=2.0$ 임을 알 수 있다. 따라서 상기 결과는 지오그리드의 보강효과를 최대화 하기 위해서는 적어도 $L/B=2.0$ 으로 유지해야함을 말해준다. 본 연구에서 얻어진 최적포설길이 $[(L/B)_{op}=2.0]$ 는 사질토를 대상으로 지오그리드의 보강효과에 관한 실험적 연구를 수행한 Guido 등(1986)의 연구결과와 거의 유사하나 지오텍스타일을 대상으로 한 Fragaszy 등(1984)의 연구에서 얻어진 최적길이 $[(L/B)_{op}=6.0]$ 와는 상당한 차이를 보이고 있는데 이는 지오그리드와 지오텍스타일의 보강 메카니즘의 차이에서 비롯된 것으로 사료된다.

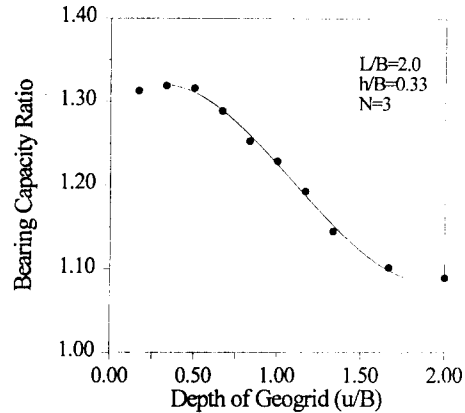


그림 5. 지오그리드의 포설깊이에 따른 BCR 변화 경향

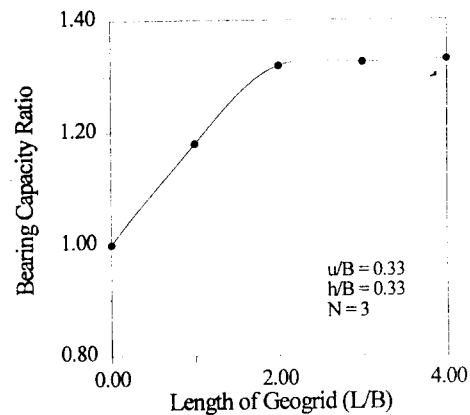


그림 6. 지오그리드의 포설길이에 따른 BCR 변화 경향

지오그리드를 중첩배치시켜 지반을 보강할 경우 지오그리드의 포설층수(N)에 따른 BCR 변화 경향을 알아보기 위하여 포설깊이와 길이를 각각 $u/B=0.33$, $L/B=2.0$ 으로 고정시키고 각 층 사이의 거리를 $h/B=0.33$ 으로 유지하면서 지오그리드를 계속 첨가시키며 해석을 수행

하였다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 BCR은 N이 증가함에 따라 거의 일정한 비율로 증가하다가 $N \geq 6$ 인 경우 일정한 값을 유지하는 경향을 보여 최적포설층수는 $N_{opt}=6$ 임을 알 수 있다. 따라서 임의의 강성을 갖는 지오그리드를 이용하여 $h/B=0.33$ 으로 유지하며 지반을 보강할 경우 포설층수를 6으로 제한함으로써 경제적인 설계가 될 수 있음을 말해 준다. $N=6$ 일 경우 보강범위는 기초의 저변으로부터 약 2.0B 이내에 놓이게 되는데 이는 보강재가 지반의 전단영역에 위치하여야만 보강효과를 갖음을 말해준다.

지오그리드의 강성에 따른 보강지반의 지지력 변화 양상을 알아보기 위해 3층의 지오그리드가 중첩배치된 경우를 대상으로 동일한 포설 조건에 대하여 지오그리드의 강성을 변화시키며 해석하였다. 해석에서 고려된 지오그리드의 강성은 $J=500$ kN/m, 1000 kN/m, 1500 kN/m, 2000 kN/m의 4종류이다. 그림 8에서 보이는 바와 같이 BCR은 지오그리드의 강성이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이다가 $J=1500$ kN/m 이상의 강성에서는 별다른 지지력 증가 효과를 보이지 않음을 알 수 있다. 이러한 경향은 지오그리드의 강성을 증가시킴으로써 어느 정도의 지지력 증가효과를 얻을 수 있으나 강도가 높아질수록 증가 정도가 감소하여 그 효과가 떨어짐을 보여준다.

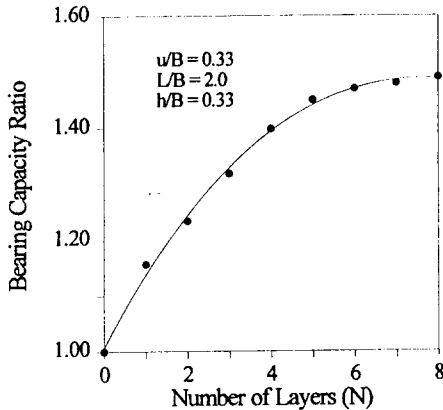


그림 7. 지오그리드의 포설층수(N)에 따른 BCR 변화 경향

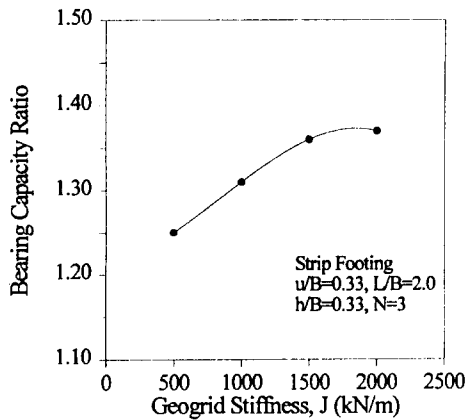


그림 8. 지오그리드의 강성에 따른 BCR 변화 경향

보강지반에 의해 지지되는 기초를 설계할 경우 설계하중을 고려하여 이에 적합한 강도를 갖는 지오그리드의 종류를 설정하고 포설층수 등의 포설조건을 결정하여야한다. 이 경우 설계자는 다층의 저장도

지오그리드로 포설할 것인지 또는 고강도 지오그리드를 사용하여 포설층의 수를 줄일 것인지를 결정하여야 하므로, 본 연구에서는 지오그리드의 효율적인 포설방법을 알아보려고 기초아래의 임의의 면적(폭 2.0B, 깊이 1.0B)을 여러 종류의 지오그리드($J=500$ kN/m, 1000 kN/m, 2000 kN/m)로 보강하는 경우를 해석하였다. 즉 보강면적의 지오그리드 포설층수를 조절하여 보강면적당 포설된 지오그리드의 총강성이 같은 3가지 경우를 해석하여 이에 따른 지지력 변화 경향을 알아 보았다. 해석결과의 객관성을 위해 포설위치와 각 층간의 거리는 $u/B=0.33$, $h/B=0.33$ 으로 고정시켰다. 해석결과는 표 1에 나타나 있는 것과 같이 보강면적당 포설된 지오그리드의 총강성이 동일한 경우, 4층의 저장도 지오그리드가 포설된 경우가 단일층의 고강도 지오그리드가 포설된 경우 보다 약 10% 증가된 지지력을 보이고 있다. 이러한 결과는 다층의 저장도 지오그리드에 의한 보강방법이 단일층의 고강도의 지오그리드로 보강하는 방법이 보다 효율적임을 말해준다.

표 1. 지오그리드 포설방법에 따른 BCR 변화 경향

CASE	Bearing Capacity Ratio
Case 1: $J=500$ kN/m, $N=4$	1.29
Case 2: $J=1000$ kN/m, $N=2$	1.24
Case 3: $J=2000$ kN/m, $N=1$	1.19

본 고에서 제시된 BCR과 여러 설계변수들의 관계는 지오그리드를 이용한 보강지반의 설계기준으로 유용하게 사용되어질 수 있다. 이러한 설계기준은 본 연구에서 대상으로한 연약점토지반에 국한되지만, 다양한 지반을 대상으로 연구를 확장시킬 경우 현장에서 사용되어질 수 있는 설계기준 또한 어렵지 않게 마련할 수 있다. 이러한 설계기준은 주어진 설계하중에 적합한 지오그리드 포설조건의 설정을 가능하게 하므로 보다 안전하고 경제적인 설계가 될 수 있게 할 것으로 사료된다.

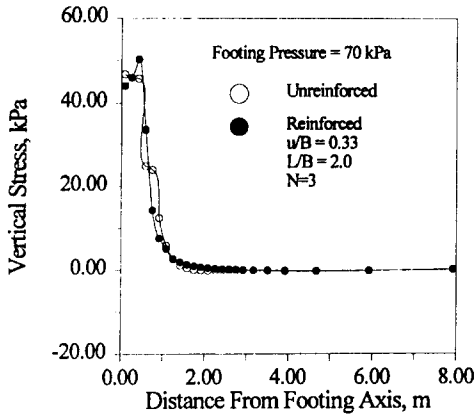
4.2 보강지반의 역학적 거동 특성

앞절에서 알아본 바와 같이 지반에 포설된 지오그리드는 인장보강효과를 통해서 지반의 지지력을 증가시킨다. 즉 기초하중이 지반의 응력과 변형을 증가 시킴에 따라 지오그리드는 인장저항력을 발휘하게 되고, 지반내의 응력의 일부를 부담함으로써 지반의 침하를 감소시킴과 동시에 소성파괴를 억제하는 효과를 가져오게된다. 본 연구에서는 이러한 지오그리드의 보강 메커니즘에 대한 근본적인 이해를 목적으로 지반내의 응력분포, 소성파괴형상, 변형패턴, 지오그리드내의 인장력 등 유한요소해석의 결과를 토대로 보강지반의 역학적 거동특성을 고찰하였다.

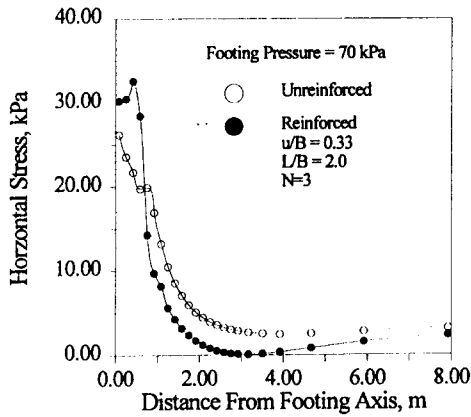
그림 9는 70kPa의 기초하중이 작용할 경우 기초저변으로부터 약 0.67B아래에 위치한 수평면에서 발생하는 비보강지반과 보강지반의 응력분포경향을 비교하고 있다. 보강된 지반에는 3층의 지오그리드가 중첩배치되어 있으며 0.33B의 간격으로 포설 되어있다. 그림에서 보이는 바와 같이 수직응력은 별다른 차이를 보이지 않고 있으나, 보강지반의 수평응력은 비보강지반의 그것과 비교하여 현저히 감소하였음을 알 수 있다. 현저한 수평응력감소가 관측되는 부분은 기초의 축으로부터 약 1.0B밖에 위치한 지역이며, 기초 바로 아래에 위치한 수평면에서는 보강지반에서 오히려 큰 수평응력이 발생하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 응력분포 경향은 지오그리드의 인장보강효과를 잘 보여주고 있다.

지오그리드의 인장보강효과는 기초하중으로 인한 지반의 변위패턴에서도 정성적으로 관찰할 수 있다. 그림 10은 비보강지반과 보강지반의 변위벡터를 도시하고 있는데 기초에 근접한 지역의 변위벡터를 살펴보면 비보강지반의 경우 상당한 크기의 수평변위가 발생함을 볼 수 있다. 이에 반해 보강지반의 경우 지오그리드로 인하여 수평변위가 억제되어 변위벡터의 방향이 수직방향을 향하고 있음을 볼 수 있는데 이는 지오그리드의 인장보강효과를 뒷받침해주고 있다. 그림 11은 동일한 하중하에서 발생하는 보강지반과 비보강지반의 소성영역을 비

교하고 있다. 보이는 바와 같이 지오그리드는 강성기반으로 작용하여 소성영역의 수직방향 침투를 억제하고 보강층 사이에 위치한 지반의 소성파괴 또한 억제함으로써 소성영역을 현저히 감소시키는 효과를 가져다 준다.

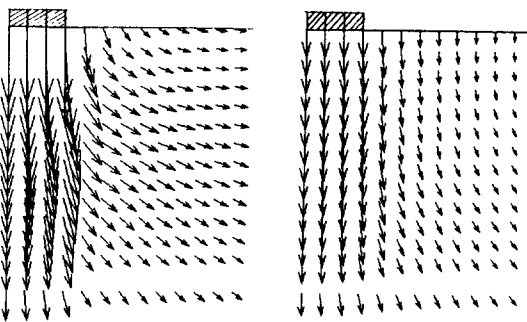


(a) 수직응력



(b) 수평응력

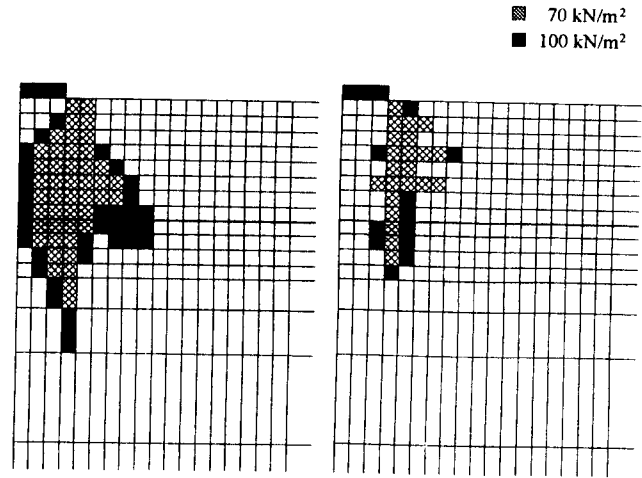
그림 9. 보강지반의 응력분포 경향



(a) 비보강지반

(b) 보강지반

그림 10. 비보강지반과 보강지반의 변위벡터 비교



(a) 비보강지반

(b) 보강지반

그림 11. 비보강지반과 보강지반의 소성영역 비교

그림 12는 70 kPa의 기초하중을 부담하는 보강지반에 포설된 지오그리드가 받는 인장력의 분포를 도시하고 있다. 각 층에서 발생하는 지오그리드 내의 인장력 분포경향을 기초와의 상대적 위치 별로 분석하면, 기초 바로 아래에 위치한 부분과 비교적 멀리 떨어진 부분에서는 보강층의 깊이가 깊어질수록 인장력이 증가하고 기초의 모서리 부분에서는 이와 반대인 경향을 볼 수 있다. 또한 각 층간의 인장력 크기의 차이를 살펴보면 기초의 바로 아래 부분에서 주목할 만한 차이가 발생함에 반해 기초의 모서리 부분에서는 별다른 차이를 보이지 않고 있다. 이러한 경향으로부터 지반에 포설된 지오그리드의 인장파괴에 대한 취약부분은 대상 층(layer)과 기초와의 상대적 위치에 따라 변함을 알 수 있다. 즉 기초에 가깝게 포설된 지오그리드는 기초의 모서리에 가까운 지점에서 인장파괴가 발생하며, 기초로부터의 거리가 멀어질수록 인장파괴가 발생하는 지점은 기초의 중심축에 가까워짐을 알 수 있다.

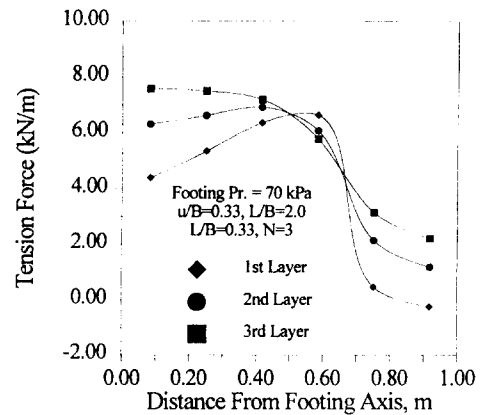


그림 12. 지오그리드 내의 인장력 분포경향

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용한 수치실험적 기법으로 지오그리드로 보강된 연약지반 위에 위치한 연속기초의 지지력 및 보강지반의 역학적 거동 특성을 알아 보았다. 지오그리드의 포설위치, 길이, 포설층수, 그리고 강성등의 설계변수에 대한 매개변수 변환 연구를 수행하여 이들 설계변수들에 따른 보강지반의 지지력 변화 특성을 정성, 정량적으로 분석하였으며, 아울러 지반의 응력분포, 소성파괴전파형상, 지오그리드내의 인장력 등 유한요소해석 결과를 이용하여 보강지반의 역학적 거동 특성에 관해 알아보았다. 연약점토지반을 대상으로한 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 지오그리드의 포설깊이를 기초의 저변으로부터 $(0.2\sim 0.5)B$ 를 유지함으로써 보강효과를 최대화 할 수 있다.
2. 보강효과가 최대로 되는 지오그리드의 포설깊이는 $L/B \geq 2.0$ 이다.
3. 임의의 강성을 갖는 지오그리드를 $h/B=0.33$ 으로 유지하며 지반을 보강할 경우 최대보강효과를 얻을 수 있는 포설층수(N)는 $N=6$ 이다.
4. 단일층의 고강도 지오그리드보다 다층의 저강도 지오그리드가 보다 효율적인 보강효과를 갖는다.
5. 지오그리드는 지반내의 수평응력을 현저히 감소시킨다.
6. 지오그리드내에 발생하는 인장력의 크기는 지오그리드의 포설위치에 따라 변하며, 포설위치가 깊어질수록 기초의 중심축에 가까운 부분에서 최대인장력이 발생한다.

참고 문헌

1. Andrawes, K.Z., Alan McGown, M., Mashhour, M.M., and Wilson-Fahmy, R.F. (1980) J. Geotech Engg. Div., ASCE 106: 1313-1326
2. Binquet, J and Lee, K.L.(1975) Bearing capacity analysis of reinforced slabs. J. Geotech Engg. Div., ASCE 101: 1257-1276
3. Das, B.M., Khing, K.H., Shin, E.C., Puri, V.K. & Yen, S.C.(1994). Comparison of bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced sand clay. Proc. 8th Inter. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown, USA, Vol II, pp 1331-1336.
4. Desai, C.S. and Zaman, M.M.(1984) Thin-Layer Elements for Interfaces and Joints. International Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics, Vol 8, pp 19-43
5. Fragaszy, R.J. and Lawton, E.(1984) Bearing Capacity of Reinforced Sand Subgrades. J. Geotech Engg. Div., ASCE 110: 1500-1507.
6. Guido, V.A., Biesiadeck, G.I. and Sullivan, M.J.(1985) Bearing capacity of geotextile reinforced foundation. Proc. XI ICSMFE 3: 1777-1780. San Francisco: Balkema.
7. Guido, V.A., Chang, D.K. and Sweeney, M.A.(1986) Comparison of geogrid and geotextile reinforced slabs. Can. Geotech. J. 23: 435-440.
8. Otani, J.(1994) Bearing capacity analysis of reinforced foundation groundby geosynthetics. Proc. 8th Inter. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Morgantown, USA, Vol II, pp 1397-1402.
9. Schlosser, F. and Long, N-T.(1974) Recent Results in French Research on Reinforced Earth. J. Construction Div., ASCE 100: 223-237.
10. Yoo, C.S.(1993) Interaction between Shallow Foundations and Unlined Soft Ground Tunnels. Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.