

## 비점착성 사면의 그물식 뿌리말뚝의 보강효과

### Reinforcing Effect of Cohesionless Slope by Reticulated Root Piles

유 남 재\*      박 병 수\*\*      최 종 상\*\*\*  
Yoo, Nam-Jae    Park, Byung-Soo    Choi, Jong-Sang

#### ABSTRACT

This paper is an experimental study of investigating the reinforcing effect and the behavior of cohesionless slope installed with reticulated root piles.

Reduced scale model tests with plane strain conditions were performed to study the behavior of the strip footing located on the surface of cohesionless slopes reinforced with root piles. Model tests were carried out with Jumunjin Standard Sand of 45% relative density prepared by raining method to have an uniform slope foundation during tests. Slope of model foundation was 1 : 1.5 and a rigid model footing with 7cm width was used for the strip footing on the surface of model slope. Parametric model tests were performed with changing location of model footing, arrangements of root piles and angles of pile installation. On the other hands, the technique with camera shooting was used to monitor sliding surface formed with discontinuity of dyed sand prepared during formation of foundation. From test results, parameters affecting the behavior of model footing were analyzed qualitatively to evaluate their effects on the characteristic of load - settlement, ultimate bearing capacity of model footing and failure mechanism based on the formation of failure surface.

키워드 : 뿌리말뚝, 극한지지력, 하중-침하, 파괴메카니즘

Keyword : Root Pile, Bearing Capacity, Load-Settlement, Failure Mechanism

#### 서론

최근 우리나라는 급격한 도시팽창과 국토개발에 따른 용지부족 현상을 해결하기 위하여 산지나 구릉지를 절개하여 활용할뿐아니라 각종의 토류구조물 및 사면보강공법을 사용하여 가용면적을 극대화시키고 있는 상황이다. 산지나 구릉지를 절개하여 주택단지를 조성하거나 도로를 건설할 경우 강원도와 같이 급경사면을 형성하고 있는 지형조건에서는 절개 및 성토 사면의 안정성 문제가 더욱 심각하게 대두되고 있는

실정이다.

이와같이, 인위적인 요인으로 발생하는 사면붕괴 재해를 방지하기 위하여 지금까지 많은 대책 공법들이 사용되어 왔다. 그러나, 효과적인 사면활동 방지대책은 대상지역의 지질학적, 지형학적 및 지반공학적 특성에 따라 다를 수 있다. 즉, 국가나 지역에 따라 기상특성, 지반특성 및 사면활동 발생기구 특성이 달라질 수 있으므로 각 지역의 특성에 적합한 대책공법을 개발할 필요가 있다. 기존의 사면안정공법은 경사면을 식생이나 블럭으로 피복하여 강우에 의한 세굴을 방지하거나 사면의 구배를 완만하게 하여 안정성을 확보하는 공법이 많이 사용되었다. 그러나, 기존의 공법을 이용하여 사면활동을 억제시키기에는 다양한 지형, 지질 및 시공조건 때문에 한계가 있어 근래에 와서는 뿌리말뚝, 억지말뚝, 앵커, Soil Nailing 공법, 보강토 옹벽 등으로 사면의 저항력을 증가시키는 적극적인 공법이 많이 적용되고 있다.

\* 정희원, 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 정희원, 강원대학교 대학원 토목공학과, 박사수료

\*\*\* 강원도청, 지역계획과

이러한 절개 또는 성토사면의 안정대책공법의 하나로 최근 뿌리말뚝을 사용하여 안정성을 확보하려는 현상이 늘어나고 있는 추세이지만, 뿌리말뚝의 사면안정효과 및 그의 거동에 관한 연구가 국내에서는 미흡한 실정이다. 그러므로 각각의 현장조건에 효과적으로 뿌리말뚝을 활용하기 위해서는 지반 내에 설치된 뿌리말뚝의 사면안정효과 및 그의 거동을 정확하게 조사·분석하여야 할 것이다.

뿌리말뚝 공법은 나무뿌리가 흙과 강력하게 부착되어 오랜세월 동안 폭풍우에 견디는 원리를 이용하여 나무뿌리 역할을 인공적으로 제작한 보강재로 대체하여 구조물을 지지 또는 지지지반을 보강하는 아이디어를 현실화 한 것이다. 1952년 F. Lizzi가 "Pali Radice"라는 이름으로 원시 형태의 뿌리말뚝을 처음 소개하고, 이태리의 폰데딜 회사(Fondedile S.P.A)가 기존 구조물의 기초를 보강하기 위한 목적의 "Reticolo Di Pali Radice"로 특허를 얻은 이래 최근에 와서 기초, 옹벽, 사면안정, 지지력이 약화된 기존 구조물의 기초보강 등에 널리 사용되고 있다.[10][11][12][13][14] 뿌리말뚝의 목적은 현장조건에 맞추어 여러 방향으로 소구경 말뚝을 설치하여 흙-말뚝 3차원 저항체를 형성하여 지반을 보강하는 공법이다.

이 공법은 도심지에서의 공사, 낮은 구조물의 기초보강, 대형 장비 진입이 어려운 산악지형, 소음이나 먼지, 진동 등 환경 공해에 대한 제약이 심한 경우에 효과적인 공법으로서 국외에서는 많은 시공 사례가 있으나 국내에서는 아직 뿌리말뚝 공법에 관한 연구 및 시공이 미흡한 실정이다. 한편, 많은 시공 사례에도 불구하고 뿌리말뚝의 역학적 구조가 아직 명확히 규명되지 않았으며, 이론식이 개발되어 적용되더라도 이질토층이나 복잡한 현장의 경우에 수많은 가정으로 인하여 실제로 적용하기에는 많은 무리가 있다. 이러한 이유로 지금까지 뿌리말뚝 설계는 현장 실험과 경험에 의존해 왔다.

따라서, 본 연구에서는 사질토지반의 경사진 사면에 뿌리말뚝을 설치하고, 사면과 인접하여 건물이나 기타 구조물이 위치할 수 있는 현장조건을 고려하여 사면 상부의 지표면에 상재하중을 재하하는 일련의 실내축소모형실험을 실시하여 말뚝의 보강효과를 검토하고자 하였다. 모형실험은 사면의 경사각을 일정하게 유지하고, 기초의 재하위치비 및 말뚝의 설치 배열, 경사각 등을 변화시키면서 매개변수적 실험을 수행하여 그들이 사면의 극한지지력, 하중 - 침하 특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험 내용

본 연구의 모형실험에서 지반으로 사용된 주문진 표준사의 기본적인 특성을 파악하기 위하여 기본 물성실험을 실시하였으며, 전단강도 정수와 해석에 필요한 매개변수를 구하기 위하여 직접전단실험 및 삼축압축실험을 실시하였다. 주문진 표준사의 입경가적곡선은 Fig. 1과 같으며, 통일분류법(USCS)에 의한 분류결과는 SP에 해당되는 입도분포의 균등한 중립질 모래이고 기본적인 물리적 특성 및 전단강도 정수는 표 1과 같다.

Table 1. Basic Soil Properties of Jumunjin Standard Sand

Grain Size Distribution	$D_{10} = 0.21 \text{ mm}$ $C_u = 1.19$ $C_c = 1.01$
Maximum Dry Density	$1.682 \text{ g/cm}^3$
Minimum Dry Density	$1.384 \text{ g/cm}^3$
Maximum Dry Density	0.879
Minimum Dry Density	0.546
Specific Gravity	2.6
Shear Strength	$\phi = 35.56^\circ, c = 0$

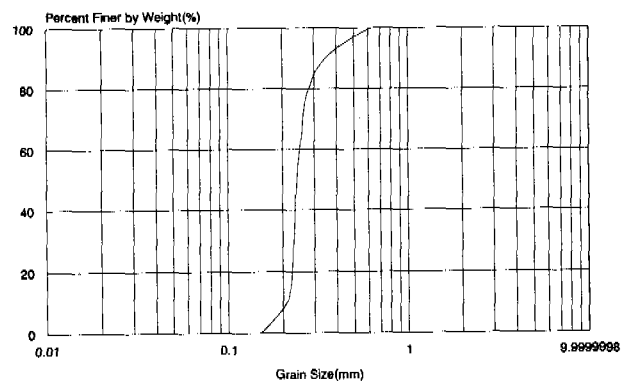


Fig. 1. Grain Size Distribution of Jumunjin Standard Sand

비점착성 사면을 실내실험에서 재현하기 위하여 상대밀도 45%로 경사사면을 조성하였다. 사면 경사각은 성토사면 구배인 1:1.5(33.7°)로 조성하였다. 사면을 조성한 후 길이 15cm의 말뚝 8개를 이용하여 말뚝의 배열을 1열, 2열, 3열, 말뚝의 경사각을 사면에 수직(NS : Normal of Slope) 및 중력방향(GD : Direction of Gravity)으로 변화시켰으며, 모형기초의 재하위치비(b/B, 여기에서 b는 사면정부에서 기초까지의 거리이며, B는 기초의 폭)를 0, 1, 2로 변화시키

면서 하중재하실험을 수행하였다. 실험에 고려된 매개변수의 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Details of Model Test

매개변수	사면의 경사각	기초폭 (cm)	말뚝의 설치경사각		말뚝의 설치배열			기초의 재하 위치비(b/B)		
			사면 방향과 격자 (NS)	중력 방향 (GD)	1	2	3	0	1	2
제원	33.7°	7								

### 2.1 모형토조의 제작

모형 뿌리말뚝으로 보강된 경사진 사면에 설치된 대상의 모형강성기초의 지내력에 관한 거동을 연구하기 위하여 구형의 모형토조를 제작하였다. 대상기초(줄기초, 띠기초) 형태의 재하조건을 반영하기 위하여 2차원 평면 변형조건하에서 실험을 실시하였다. Fig. 2에 보인 바와같이 토조의 측면 및 저면은 1.4 cm 두께의 고강도 알루미늄을 사용하였으며, 토조의 장방향 측면의 변형을 억제하기 위하여 상단에 크립을 설치하여 기초판 위에 하중재하에 따른 변형을 최소화함으로써 평면 변형조건을 유지하였다. 한편, 평면변형 조건인 측면의 전단력 발생이 없도록 실험을 수행함과 동시에 벽마찰 유발에 따른 실험오차를 최소화 시키기 위하여 테프론 시트를 부착하였다. 모형기초 하중 재하에 따른 지반의 파괴메카니즘을 관찰하기 위하여 모형토조의 전면에는 투명한 Plexiglas를 사용하였으며, Plexiglas에는 염색된 모래의 변위를 측정하기 위하여 세로와 가로가 2cm 간격으로 그려진 격자망과 각각의 사면 경사를 표시하는 선이 그려진 투명한 비닐을 부착하였다.

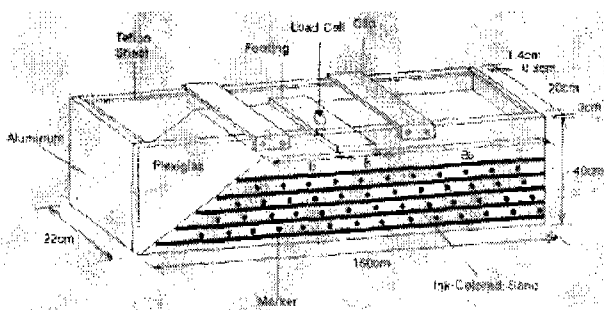


Fig. 2. A Schematic of Model Testing Apparatus

### 2.2 지반의 사면 형성

모형지반은 점착력이 없는 균질한 입경의 주문진 E준사를 사용함으로써 비점착성 사질토 지반을 모사

하는 한편, 강사법을 이용하여 사면 깊이에 따라 균질한 지반을 형성하였다. 형성된 지반의 균질한 상대밀도를 확인하기 위하여 모형지반 형성시 파괴면 형성에 영향을 받지 않는 위치에 조성지반 깊이별로 시료캔을 삽입하였으며, 실험 완료 후 시료캔의 무게를 측정하므로써 지반 성형시 상대밀도의 균질성 여부를 확인 하였다. 경사사면을 모사하는 지반 형성은 강사장지에 의하여 토조 전장에 대하여 높이 38cm까지 수평한 지반을 성형한 후 모래 흡입장치를 제작하여 Plexiglas에 부착된 투명한 비닐에 그려진 소정의 경사선을 따라 굴착하므로써 사면 형성을 위한 지반 굴착시 모형지반의 교란을 최대한 방지하였다.

### 2.3 보강말뚝 삽입

경사진 사면 내에 보강말뚝을 설치하여 말뚝의 보강효과를 규명하기 위하여 직경 2 mm, 길이 15 cm의 강철선에 접착제를 사용하여 주문진 표준사를 부착하여 보강말뚝을 모사하였다. 따라서, 표준사가 부착된 모형 말뚝의 평균 직경은 4mm이다. 이와같이 모형 보강말뚝을 사용한 것은 모형지반과 마찰주변에서 유발되는 저항력을 모형지반의 내부마찰각으로 추정하기 위함이다. 모형지반의 사면 형성이 완료된 후 Table 2에 나타낸 말뚝의 설치 배열 및 경사각을 변화시키면서 모형실험을 수행하였다. Fig. 3은 실험에 고려된 보강 말뚝의 설치배열을 보여주고 있다.

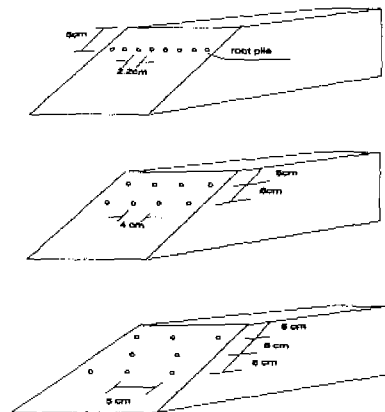


Fig. 3. Arrangement of Model Piles.

### 3. 실험결과 분석

경사진 비점착성 사면에 있어서 사면 상부 지표면에 대상의 상재하중이 작용한 경우에 그물식 뿌리말뚝의 보강효과 및 거동을 규명하기 위하여 말뚝의 설치배열, 경사각, 기초의 재하위치비 등의 실험변수를 변화시키면서 모형실험을 수행한 후, 획득한 실험결과

를 모형기초의 하중-침하 곡선의 특성, 극한지지력, 상재하중에 의한 경사사면에 발생하는 파괴메카니즘 등에 각 매개변수가 미치는 영향을 정성적으로 분석하여 뿌리말뚝의 보강효과를 다음과 같이 비교·검토하였다.

### 3.1 하중 - 침하 곡선

모형기반으로 사용한 주문진 표준사를 상대밀도 45%로 조성한 경사사면의 경사구배 1 : 1.5(경사각 : 33.7°), 대상의 모형기초 폭 7 cm를 일정하게 유지하고, 직경 2 mm, 길이 15 cm의 강철선에 주문진 표준사를 표면에 부착한 8개의 보강말뚝을 Fig. 3에 보인 바와 같이 경사진 사면 방향으로 6 cm 떨어진 위치에서 부터 말뚝의 배열을 변화시키고, 보강말뚝의 경사각은 경사사면의 직각방향 및 중력방향의 두 방향에 대하여 사면 내부로 보강말뚝을 설치하여 실험을 수행하였다. 모형기초에 가해진 하중과 측정된 연직변위를 바탕으로 하중-침하 곡선을 도시하여 Figs. 4 ~ 20에 나타내었으며, 그림에서  $b/B$ 는 사면의 정부에서 기초까지의 거리,  $b$ 를 기초의 폭,  $B$ 로 나눈비를 나타낸 것이고, row는 말뚝의 설치배열의 수, NS(Normal Direction to Slope)은 보강말뚝의 경사각이 경사사면의 방향과 연직방향으로 설치된 경우, GD(Gravitational Direction)는 보강말뚝이 중력방향으로 설치하여 모형실험을 실시하여 얻은 결과를 의미한다.

Fig. 4는 경사진 사면에 대하여 무보강 일때, 기초의 재하위치비를 0, 1, 2로 변화시켰을 때의 하중-침하 곡선을 나타낸 것으로 사면정부로부터 기초의 재하위치가 멀어질수록 지반의 탄성계수를 나타내는 곡선의 기울기가 급해지는 것을 볼 수 있으며, 전반적으로 선명한 Peak를 보여주지 않는 하중연화현상을 보여준다. 이와같은 거동은 느슨한 상대밀도를 지닌 수평한 지반에서의 기초지내력과 유사한 거동임을 알 수 있다. 이것은 선명한 활동선이 형성되는 전반전단 파괴가 발생하고 느슨한 지반에서는 국부전단파괴가 주요한 파괴 메카니즘이 적용되는 것을 알 수 있다. 따라서, 경사사면에서도 느슨한 지반에서는 국부전단 파괴 모드가 주요한 메카니즘으로 작용함을 추정할 수 있다. 재하위치비에 따른 하중 - 침하 곡선의 기울기의 변화는 경사사면에 인접하여 재하 할수록 사면지반의 자중에 의한 구속응력분포 변화에 따른 지반 강성도의 영향에 기인 한 것으로 판단된다. 그림에 나타난 것처럼 기초의 재하위치가 사면 정부에서 멀어질수록 극한하중이 증가하는 것은 기초의 재하위

치가 사면 정부로부터 멀어질수록 파괴에 저항하는 지반의 자중 증가로 인한 구속압력이 커지기 때문인 것으로 판단된다.

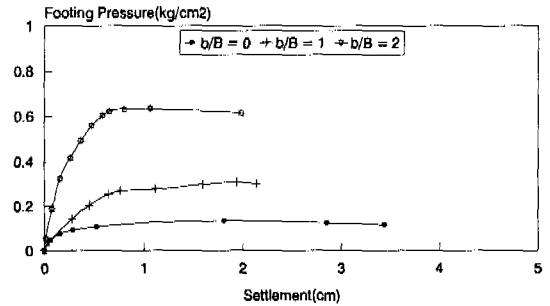


Fig. 4. Loads-Settlement Curves(no reinforcement)

Figs. 5 ~ 10은 기초의 재하위치비를 0, 1, 2로 변화시켰을 때의 하중 - 침하 곡선을 도시한 것으로 전반적으로 기초의 재하위치가 사면 정부에서 멀어질수록 무보강일 경우와 마찬가지로 파괴이전의 변형거동을 나타내는 곡선의 기울기 및 극한하중이 증가하는 것을 볼 수 있다. Figs. 5, 6은 말뚝의 설치배열이 1열이고, 말뚝의 설치 경사각이 중력방향과 사면 경사방향과 연직일 때, 기초의 재하위치비를 0, 1, 2로 변화시켰을 경우 실험결과이다. Fig. 5에서 보인바와 같이 극한상태 이전까지의 하중 - 침하 곡선은 재하위치와 무관하게 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서, 파괴이전의 작용하중 조건(Working Load Condition) 범위에서 지반의 강성도를 증가시켜주는 효과가 있음을 알 수 있다. 한편, Fig. 5는 무보강 사면과 비교하여 보았을 때, 극한지지력이 뿌리말뚝의 설치에 따라 현저히 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 6은 사면의 경사에 직각으로 뿌리말뚝을 설치한 경우로서 Fig. 5에서 보인바와 같이 재하위치비가 증가할수록 하중 - 침하 곡선의 기울기 및 극한지지력이 증가하는 경향을 보여줄 수 있다. 하중 - 침하 곡선의 극한값에 도달하는 기초의 연직변위는  $b/B=0$ 인 경우를 제외하고는 거의 일치함을 알 수 있으며, Peak 값을 나타내는 극한지지력 값은 경사사면에 수직방향으로 설치한 경우가 중력방향으로 설치한 경우보다 다소 증가하고 있음을 알 수 있다. 한편, Figs. 5, 6에서 알 수 있듯이 무보강 지반에서는 변위 경화현상, 즉 하중 - 침하 곡선에서 Peak 값이 없이 극한값에 도달하였으나 보강지반에서는 느슨한 지반 일지라도 극한지지력의 최대치에 도달한 후 기초반력의 감소가 나타남을 알 수 있다. 이와같은 현상은 하

중 - 침하 곡선상의 극한지지력에 도달하는 동안에는 뿌리말뚝의 인발 저항력에 의하여 사면 전체의 지지력을 유지하다가 사면 지반과 뿌리말뚝 사이의 미끄러짐(Slip)에 의하여 뿌리말뚝의 저항력이 한계상태에 도달함과 동시에 사면내의 활동면 사이에 정지상태 부분과의 상호변위에 의한 활동이 발생되어서 급격히 하중반력이 감소되는 것으로 예상된다. 이와같은 현상은 Figs. 7 ~ 10에 도시된 바와같이 뿌리말뚝 설치배열 또는 설치각도와 관계없이 유사한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

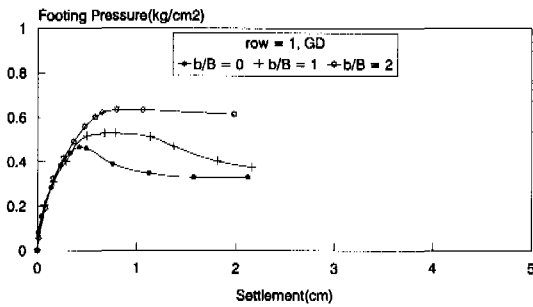


Fig. 5. Loads-Settlement Curves(row=1, GD)

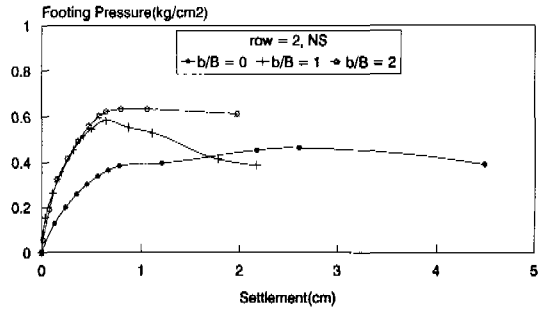


Fig. 8. Loads-Settlement Curves(row=2, NS)

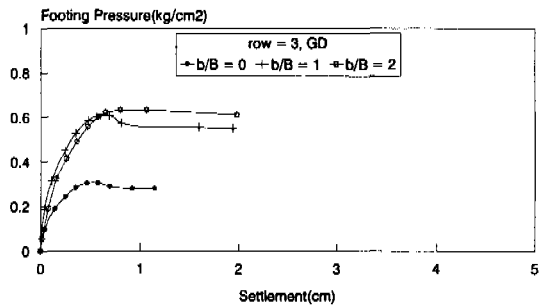


Fig. 9. Loads-Settlement Curves(row=3, GD)

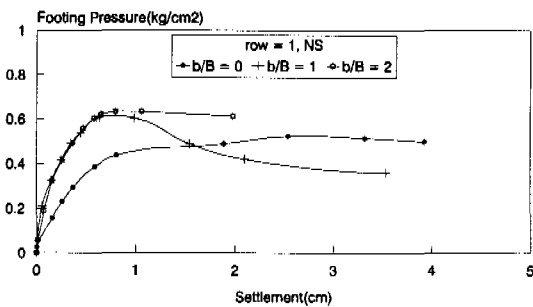


Fig. 6. Loads-Settlement Curves(row=1, NS)

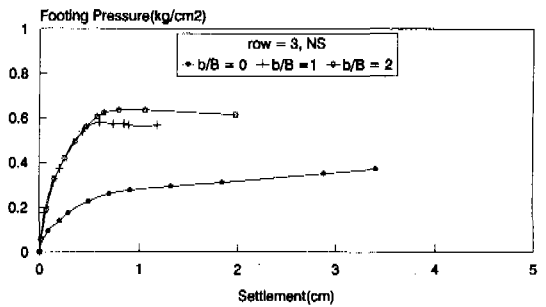


Fig. 10. Loads-Settlement Curves(row=3, NS)

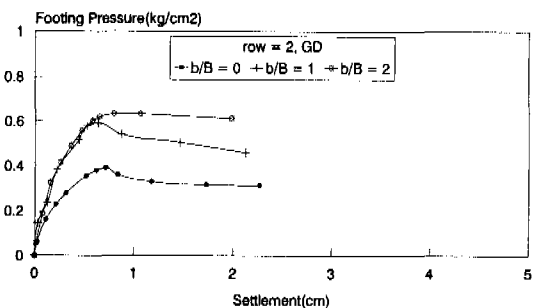


Fig. 7. Loads-Settlement Curves(row=2, GD)

Figs. 11, 12는 보강말뚝의 설치배열을 1, 2, 3열로 변화시켰을 경우의 하중 - 침하 곡선으로 기초가 사면 정부에 위치한 경우 즉  $b/B = 0$ 인 경우에 보강말뚝의 설치 경사각이 중력방향 일때는 작은 침하량에서 선명한 Peak를 보여주고 있으며, 말뚝의 설치경사각이 사면의 경사방향과 연직일 경우는 선명한 Peak를 보이지 않음을 볼 수 있다. 한편, 극한하중은 기초의 재하위치비가  $b/B = 0$  일 경우 말뚝의 배열을 1 - 3 열로 보강했을 경우 하중 - 침하 곡선에서 볼 수 있듯이 1열로 보강했을 경우 극한하중이 가장 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 실험에 고려한 8개의 말뚝을 2, 3 열로 보강했을 경우보다 1열로 보강했을 경우에 파괴면 외측의 사면지반 부분인 정지상태 영역에

서 말뚝의 유효길이가 증가하기 때문에 발생하는 결과로 판단된다. Figs. 13, 14는 기초의 재하위치비를 1로 변화시켰을 경우로서 전반적으로 지반의 탄성계수를 나타내는 곡선의 기울기가 선명한 Peak를 나타내며, 극한하중은  $b/B = 0$ 인 경우와 반대로 말뚝의 배열을 3열로 보강하였을 경우에 가장 큰 극한하중을 보여주고 있는데, 이것은 기초의 재하위치비가 증가하게 되면 대수나선 형태의 파괴면 면적이 증가함에 따라 말뚝을 1열로 배치했을 경우보다 2, 3열로 배치할 경우에 상대적으로 유효길이가 증가하기 때문에 나타나는 결과임을 알 수 있다.

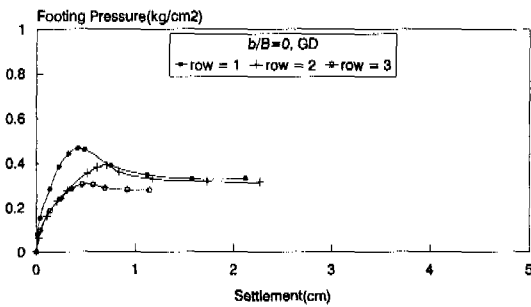


Fig. 11. Loads-Settlement Curves( $b/B=0$ , GD)

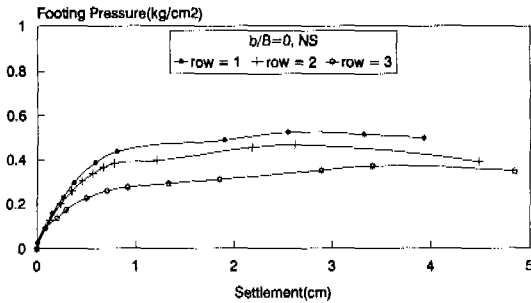


Fig. 12. Loads-Settlement Curves( $b/B=0$ , NS)

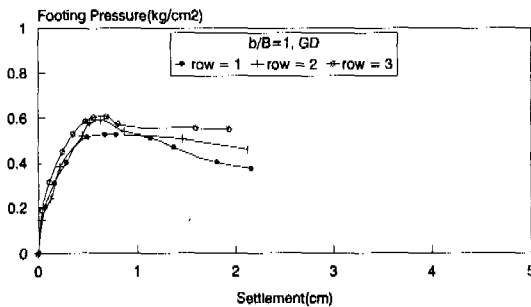


Fig. 13. Loads-Settlement Curves( $b/B=1$ , GD)

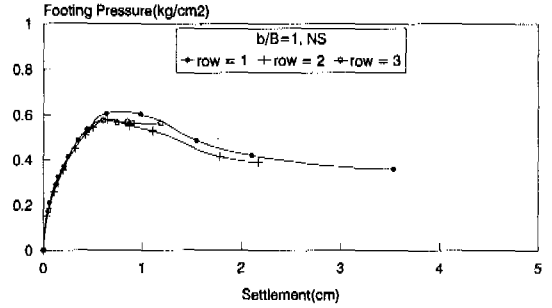


Fig. 14. Loads-Settlement Curves( $b/B=1$ , NS)

Figs. 15 ~ 20은 말뚝의 설치경사각을 변화시켰을 경우의 하중 - 침하 곡선을 나타낸 것으로 전반적으로 극한하중 값에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

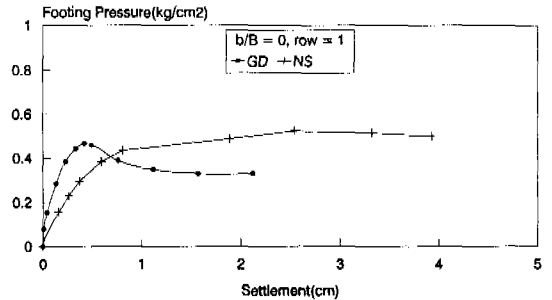


Fig. 15. Loads-Settlement Curves( $b/B=0$ , row=1)

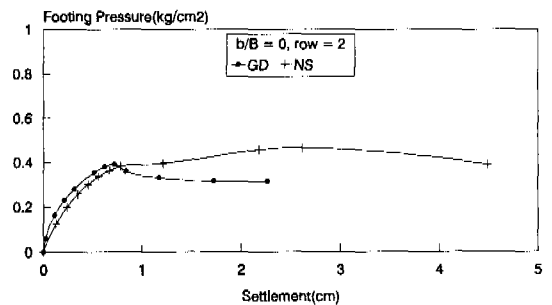


Fig. 16. Loads-Settlement Curves( $b/B=0$ , row=2)

하중-침하 곡선에 관한 전반적인 모형실험결과는 실험에 사용된 말뚝의 길이 15 cm에 대하여 기초의 재하위치비가 2 이상이면 말뚝의 보강효과는 없는 것으로 나타났다. 이것은 기초의 재하위치비가 2 이상이 되면 유발되는 파괴면의 면적이 증가하기 때문에 파괴면 바깥쪽의 말뚝의 유효길이가 아주 미소하거나 보강말뚝이 활동토체 내부에 위치하기 때문에 말뚝의 보강효과가 없는 것으로 판단된다.

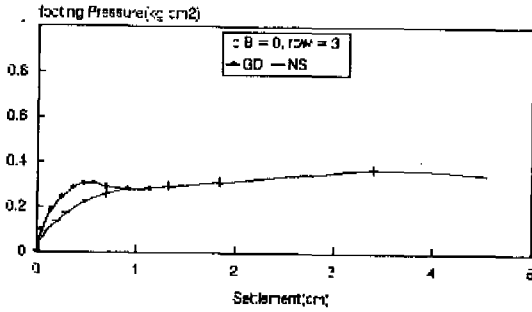


Fig. 17. Loads-Settlement Curves( $b/B=0$ , row=3)

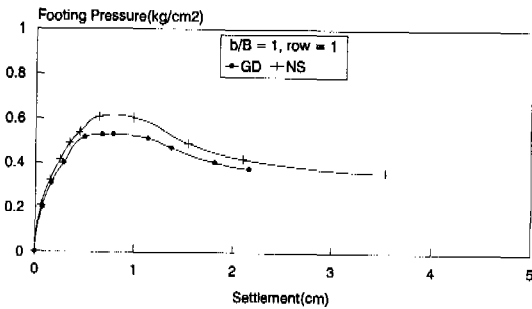


Fig. 18. Loads-Settlement Curves( $b/B=1$ , row=1)

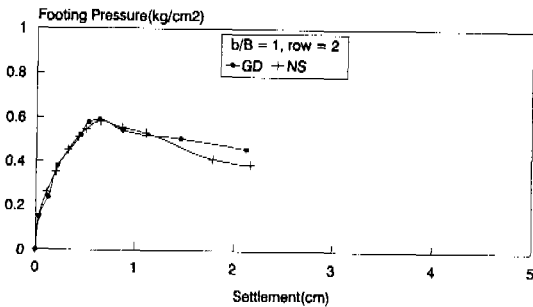


Fig. 19. Loads-Settlement Curves( $b/B=1$ , row=2)

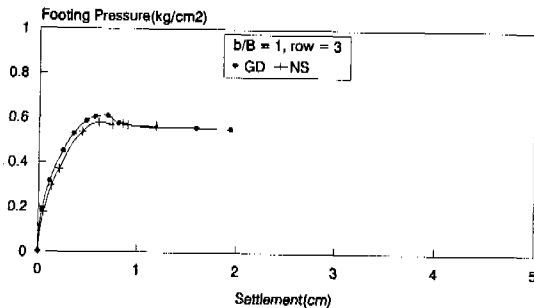


Fig. 20. Loads-Settlement Curves( $b/B=1$ , row=3)

한편, 경사진 사면에 있어서 그물식 뿌리말뚝의 보 효과 및 그 거동을 규명하기 위하여 본 연구에서 시한 모형실험은 기초의 재하위치비, 말뚝의 설치

배열 및 경사각의 세가지 변수만을 고려하여 수행하였는데, 더욱 정확한 실험결과를 얻기 위해서는 말뚝의 길이 및 중첩배치를 고려한 포괄적인 실험의 수행이 요구되어진다.

#### 4.2 극한지지력

말뚝의 배열, 경사각, 기초재하위치비 등을 변화시키면서 모형실험을 실시하여 얻은 하중 - 침하곡선에서 최대강도의 값을 극한지지력으로 선정하여 결과를 분석하였다.

Fig. 21은 기초의 재하위치비를 0, 1, 2로 변화시키고, 말뚝의 배열을 1, 2, 3 열, 말뚝의 설치방향을 중력방향으로 설치했을 경우의 극한지지력의 변화를 나타낸것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적으로 기초의 재하위치비가 0, 1, 2로 커지면서 극한지지력은 증가하고, 기초의 재하위치비가 0 일때 말뚝의 배열이 1열일 경우에 가장 큰 극한지지력이 발생하였으며, 기초의 재하위치비가 1일 경우에는 말뚝의 배열이 3열일때가 가장 큰 극한지지력이 발생하였다. 이와같은 실험결과의 도출은 사면 상부 지표면에 위치한 모형 기초의 재하에 따른 사면내의 활동선의 형성영역과 관련하여 설명할 수 있다. 재하위치비가 0인 경우, 즉 모형기초의 위치가 사면 정부에 근접하여 위치한 경우에는 기초의 뒤측 연단에서 진행되는 활동선의 형성이 대수나선의 형태로 진행되므로써 임계활동선내의 주동영역이 비교적 작은 범위로 형성됨에 따라서 주동영역 밖의 뿌리말뚝의 유효한 인발저항력이 형성되는 길이, 즉 유효길이가 길기 형성된다. 따라서, 1열로 배치한 경우가 경사사면에서 기초에 근접하게 설치되어 있으므로 유효길이가 증가하게 되어 큰 인발저항력을 유발하게 된다. 한편, 재하위치비가 증가하므로써 큰 활동선이 형성됨에 따라 말뚝 배열위치를 경사사면의 기초위치에서 멀리 배열한 경우가 유효길이가 증가됨을 추정할 수 있다. 따라서, 재하위치비가 증가할수록 그 효과는 반전 경향이 있음을 알 수 있다.

Fig. 22는 말뚝을 사면의 경사방향과 연직으로 설치했을 경우에 대한 극한지지력을 도시한 결과로서 말뚝을 중력방향으로 설치했을 경우와 거의 유사한 결과를 보여주고 있다.

전반적인 모형실험 결과에서 극한지지력은 기초의 재하위치가 사면 정부로 부터 멀어질수록 극한지지력은 증가하는 것으로 나타났으며, 기초의 재하위치비 2 이하에서 무보강에 대해 대략 2배 정도의 큰 극한지지력을 보여주고 있다. 한편, 기초의 재하위치비가 2

이상에서는 모형실험에서 말뚝의 길이를 15 cm로 고정하였기 때문에 보강 말뚝이 활동선 내부에 위치하게 되므로 보강효과가 없는 것으로 나타났다. 또한 말뚝의 설치배열을 변화시켰을 경우 극한지지력에 미치는 영향은 기초가 사면 정부에 위치할 경우 즉,  $b/B = 0$  일때는 1열로 말뚝을 설치했을 경우가 가장 큰 극한지지력을 나타냈으며,  $b/B = 1$ 에서 말뚝이 중력방향으로 설치되었을 경우에는 3열로 배치했을 경우가 가장 큰 극한지지력을 나타내며, 말뚝이 사면의 경사방향과 연직으로 설치되었을 경우에는 거의 비슷한 극한지지력을 보여주고 있다. 한편, 말뚝의 설치 경사각변화에 따른 극한 지지력은 미소한 차이지만 말뚝이 사면의 경사방향과 연직으로 설치될 경우가 미소한 차이지만 약간 큰 것으로 나타났다.

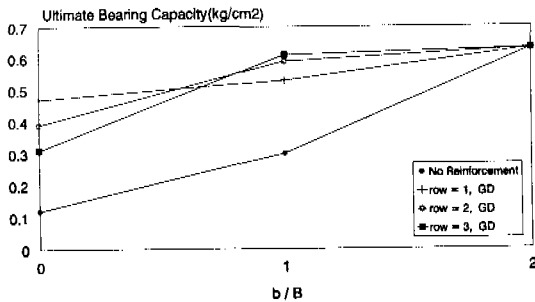


Fig. 21. Ultimate Bearing Capacity of Tests

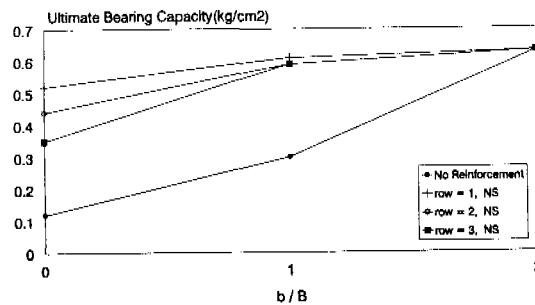


Fig. 22. Ultimate Bearing Capacity of Tests

### 3.3 파괴메카니즘

경사진 비점착성 지반에 그물식 뿌리말뚝을 보강한 경우 지반의 상대밀도 45%, 사면의 경사각 33.7°, 기초폭 7cm, 말뚝의 길이 15cm를 일정하게 유지하고, 기초의 재하위치비, 보강말뚝의 배열 및 경사각을 변화시키면서 하중재하실험을 수행한 후, 모형지반에 일정한 총별로 강사시킨 염색된 주문진 표준사의 불연속면을 사진촬영하여 Figs. 23 ~ 28에 나타냈다. 일관성 있는 사진촬영을 위하여 하중이 재하되기 전과

하중이 재하되면서 극한하중에 도달하였을 때, 그리고 한계상태에 도달하였을 때를 기준으로 사진촬영을 수행하였다.

Figs. 23 ~ 25는 본 실험에서 관찰된 전반적인 파괴형태로서 기초의 재하위치비  $b/B = 0$ , 말뚝의 설치 방향이 사면의 경사방향과 연직일 경우, 말뚝의 설치 배열을 1, 2, 3열로 변화시켰을 경우 관찰된 파괴형태이며, 활동선이 기초의 끝에서 시작하여 대수나선형태의 파괴면이 관찰되었다.

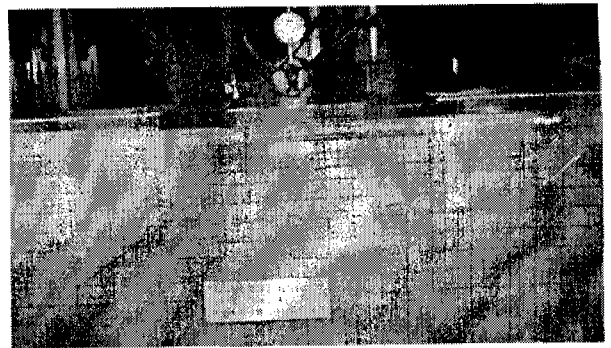


Fig. 23. Failure Mode( $b/B=0$ , row=1, NS)

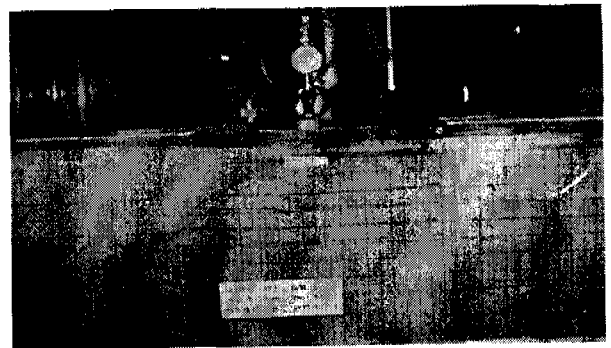


Fig. 24. Failure Mode( $b/B=0$ , row=2, NS)

Figs. 26 ~ 28는 기초의 재하위치비  $b/B = 1$  일 경우에 관찰된 파괴형태로  $b/B = 0$  일때의 파괴형태와 거의 유사함을 볼 수 있다.

그림에 나타난 바와 같이 기초재하판 중심아래 탄성영역인 썩기형태의 파괴후, 흙 썩기의 아래방향으로 이동하여 인접한 흙을 측면으로 밀리게 하여 썩기의 양측으로 수평력을 발생시켜 썩기를 중심으로 대수나선 형태의 파괴로 발전되었다. 지속적으로 사진촬영한 사진에서 나타난 파괴형태를 자세히 관찰한 결과 기초가 사면 정부에 인접할수록 활동선이 사면 방향에서 우세하게 나타남을 알 수 있었다.



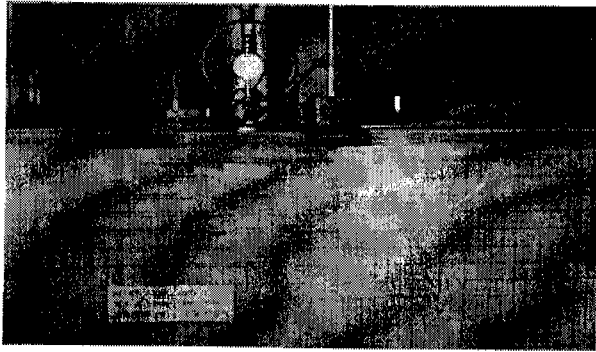


Fig. 25. Failure Mode( $b/B=0$ , row=3, NS)

이와같은 실험결과로부터 경사진 비점착성 사면에 그물식 뿌리말뚝을 이용하여 사면을 보강하고 상재하중을 재하했을 경우 형성되는 파괴형태는 상재하중의 재하위치에 따라 지배적으로 형성됨을 알 수 있으며, 활동선은 기초의 끝에서 시작하여 대수나선 형태의 파괴면이 형성됨을 관찰할 수 있었다.

설계 및 안정성 해석에서 파괴면 가정은 가장 큰 변수를 주는 요소 중 하나이므로 위와 같은 실험결과로부터 경사진 비점착성 사면에 띠기초 형태의 상재하중이 작용하는 현장조건에서 뿌리말뚝을 이용하여 사면을 보강하는 경우의 설계 및 안정성 해석에서 적절하게 이용될 수 있는 자료로 판단된다.

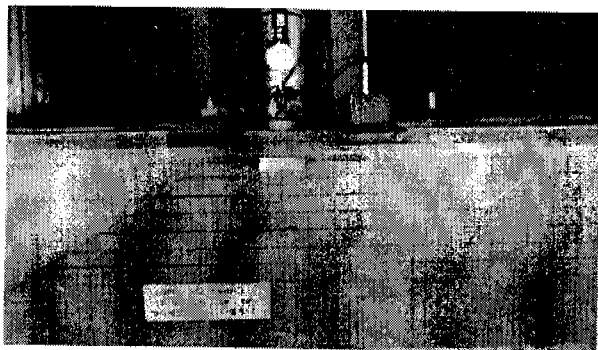


Fig. 26. Failure Mode( $b/B=1$ , row=1, NS)

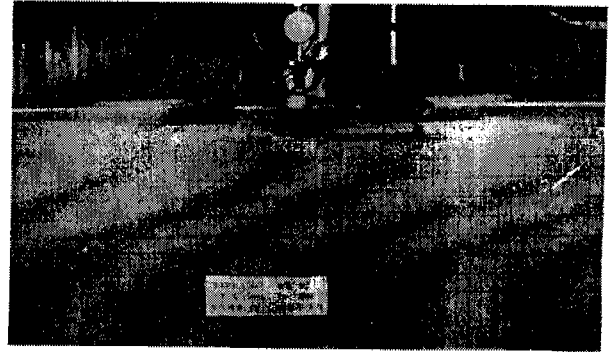


Fig. 27. Failure Mode( $b/B=1$  row=2, NS)

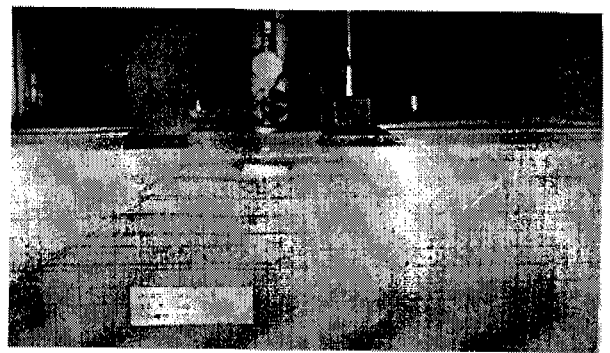


Fig. 28. Failure Mode( $b/B=1$ , row=3, NS)

#### 4. 결 론

본 연구는 그물식 뿌리말뚝에 의한 비점착사면의 보강효과에 관한 실험적 연구로서 말뚝의 배열, 설치 경사각, 기초의 재하위치비 등을 변화시키는 모형실험을 실시하여 하중-침하곡선, 극한지지력등에 미치는 영향을 정성적으로 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모형실험 결과 뿌리말뚝 설치에 따라 사면의 극한 지지력 및 지반 강성도가 증가하였다.
- 2) 모형실험 결과에서 극한지지력은 기초의 재하위치비가 사면정부로 부터 멀어질수록 증가하였다.
- 3) 경사진 비점착 사면에 뿌리말뚝으로 보강하였을 경우, 기초의 재하위치비 2 이하에서 무보강 일때 보다 극한지지력이 대략 2배의 보강효과를 나타냈다.
- 4) 실험조건에서 재하위치비가 2 이상이면 활동선 외측의 말뚝의 유효길이의 감소로 인하여 보강효과가 거의 없는 것으로 나타났다.
- 5) 말뚝의 설치 경사각 변화에 따른 영향은 사면의 경사방향과 연직 방향 및 중력방향으로 설치했을

경우, 미소한 차이지만 사면의 경사방향과 연직으로 설치했을 경우가 큰 지지력을 나타냈다.

- 6) 보강된 사면에 기초재하시 사면활동은 기초 연단에서 발달하여 대수나선형으로 진전되는 진행성 파괴임을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] Hughes, J. M. O., Withers, N. J. & Greenwood, D. A., "A Field Trial of the Reinforcing Effect of a Stone Column in Soil", *Geotechnique*, Vol. 25, GT1, pp.31-44, 1975.
- [2] Kolvmaki, O., "Friction between Sand and Metal", *8th ECSMFE*, Vol. 2, session 5.13, Helsinki, pp. 157-520, 1983.
- [3] Vidal, H., "La Terre Armee", *Annales ITBTP*, Paris, 1966.
- [4] Ingold, T.S., "Reinforced Earth", *Thomas Telford Ltd.*, London, 1982.
- [5] Juran, I., Shaffiee, S., Schlosser, F., Humber, P., Guenot, A., "Study of Soil - Bar Interaction in the Technique of Soil Nailing", *8th ECSMFE*, Vol. 2, session 5. 12, Helsinki, pp. 12-13, 1983.
- [6] Verma, B. P. and Char. A. N. R., "Bearing Capacity Tests on Reinforced Sand Subgrades", *Proc. of ASCE. G.T. Div.*, 1986.
- [7] Cartier, G., Gigan, J. P., "Experiments and Observations on Soil Nailing Structures", *8th ECSMFE*, Vol. 2, session 5.4, Helsinki, pp. 473-476, 1983.
- [8] Gassler, G., Gudehus, G., " Soil Nailing - Stastical Design", *8th ECSMFE*, Vol. 2, session 5.7, Helsinki, pp. 591-494, 1983.
- [9] Guilloux, A., Notte, G., Gonin, H., "Experiences on a Retaining Structure by Nailing in Moraine Soils", *8th ECSMFE*, Vol. 2, session 5.9, Helsinki, pp. 499-502, 1983.
- [10] Lizzi, F., "La Restauration Stique des Monuments Historiques Suivant les Techniques FONDEDILE", *Lecture Delivered to the Compagnie des Architectes en Chef des Monuments Historiques*, Paris, 1976.
- [11] Lizzi, F., "Les Pieux Racine FONDEDILE et les Reaux de Pieux Racine", *Conference donnee aux Journees de Mecanique des Sols, Ecole Centrais*, Paris, 1973.
- [12] Lizzi, F., "Practical Engineering in Structurally Comlex formations (The In-Situ Reinforced Earth)", *International Symposium on the Structurally Comlex formation*, Capri, Italy, 1977.
- [13] Lizzi, F., "The Leaning Mosul Minaret Restoration Works", *Proc. 10th ICSMFE*, Vol. 4, Stockholm, 1981.
- [14] Thorburn, S. and Hutchison, J. F., "Underpinning", Glasgow and London, 1985.
- [15] Lizzi, F., "The Retico Di Racice '(Reticulated Root Piles)' for the improvement of Soil Resistance. Physical Aspect and Design Approaches", *8th ECSMFE*, Vol. 2, session 5.14, Helsinki, pp. 521-524, 1983.
- [16] Lizzi, F., "Special Parented Systems of Underpinning by Means of Root Piles(Pall Radice)", *Conference donnee aux*, Mit, Boston; Universite de l'illinois; U.S. Bureau of Reclamation, Denver, U.S.A.; Club of Civil Engineers, Vanvouver, Canada.
- [17] Lizzi, F., and Carnevale, G. "Les Reseaux de Pieux Racines pour la Consolidation des Sols, Ascepts Theoretique et Essais sur Mondile " *Proc. Int. Conf., Soil Reinforcement*, Paris, Vol.2, pp. 317-324, 1979.
- [18] Lizzi, F., "The Pali Radice '(Root Piles) - A state-of art Report", *Sympoium on Recent Developments in Ground Improvement Technique*, Bankok.