

# 컴퓨터 프로그램을 이용한 기초보강용 그물식 뿌리말뚝의 거동 분석

( Analysis on the Behavior of Reticulated Root Piles  
for Reinforcing Footing using Computer Program )

박 영 호\*1      변 광 옥\*2  
Park, Young-Ho      Byun, Gwang-Wook  
이 원 태\*3      김 명 모\*4  
Lee, Won-Taek      Kim, Myung-Mo

---

## Abstract

When reinforcing strip footing on a sand ground with reticulated root piles, reinforcing effect depends on the length, number, cross sectional area, penetration angle, spacing, and Young's modulus of piles, the mode of action of reinforcement tendons in soil isn't one of carrying developed tensile stresses but of anisotropic (uni-directional) reduction or even suppression of one normal strain rate.

R. H. Bassett and N. C. Last proposed that the reinforcement should be located on the direction of minor strain rate which coincides with the tensile strain rate in the velocity characteristics. Based on this proposal, the author carried out a series of 2 - dimensional finite element analysis which varies the parameters mentioned above.

## 요지

사질토 지반위에 놓인 띠기초에 뿌리말뚝을 사용하여 지반 보강할 때, 보강효과는 말뚝의 길이와 개수, 단면적, 근입 각도, 배치 간격, 탄성 계수, 흙과 말뚝과의 마찰계수 등에 영향을 받는다. 흙에서의 보강재의 작용은 인장력을 받는 것이 아니라 한 방향의 변형률 속도를 감소시키거나 억제하는 것이다.

R. H. Bassett 와 N. C. Last는 속도특성곡선에서 변형률 속도가 인장이 되는 최소 주 변형률 속도방향을 따라 보강재를 배치하는 것이 효과적이라고 하였다. 이 제안을 토대로 말뚝의 길이와 개수, 단면적, 근입각도, 배치 간격, 탄성계수 등을 변화시켜가며 2차원 유한요소해석을 실시하였다.

---

\*1 서울대학교 공과대학 토목공학과 대학원

\*2 대림엔지니어링 정보사업부 계장

\*3 정회원 : 호남대학교 공학대학 토목공학과 전임강사

\*4 정회원 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

## 1. 서론

뿌리 말뚝을 기초보강에 적용하기 위한 기존의 연구 사례는 R. H. Basset 와 N. C. Last 의 논문에서 찾아 볼 수 있다. 그들은 변형률 속도특성에 근거한 보강 방향을 제시하였고, 그림 3와 같이 곡선 형태로 뿌리말뚝을 배치하는 것이 최적이지만 실제에 있어서 곡선 형태로 말뚝을 설치하는 것은 거의 불가능하다. 그래서 Bassett 는 그림 4,5와 같은 형태의 보강패턴을 제안했다. 말뚝의 보강효과는 다음과 같은 요인들에 의하여 결정된다.

- ㉠. 말뚝의 길이    ㉡. 말뚝의 갯수    ㉢. 말뚝의 단면적    ㉣. 말뚝의 탄성계수
- ㉤. 기초와 말뚝 사이의 거리    ㉥. 말뚝의 근입각도    ㉦. 말뚝과 지반의 마찰계수

본 연구에서는 Bassett 와 Last가 제안한 보강패턴을 기준으로하여 각 인자들을 변화시키며 해석을 실시하여 개선된 최적 보강 패턴을 제안하고자 한다.

## 2. 그물식 뿌리 말뚝공법의 개요

가파른 벼랑에 위태롭게 서있는 나무는 심한 폭풍우에도 꺾여지지 않고 잘건디어낸다. 이것은 사방으로 뻗은 크고 작은 나무뿌리가 흙과 일체가 되어 나무에 작용하는 외력에 저항하기 때문이다. 이점에 착안하여 나무 뿌리 역할을 하는 요소를 지반에 인공적으로 삽입하여 구조물을 지지하고자 하는 아이디어를 현실화한 것이 그물식 뿌리 말뚝 공법 (Reticulated Root Piles : R.R.P.) 이다.

1952년에 F.Lizzi 가 Pali Radice(root pile)라는 이름의 소구경 말뚝을 처음 소개하였고, Italy 의 폰데딜사(Fondedile S.P.A)가 기존 구조물의 기초를 보강하기 위한 목적으로 Reticolo Di Pali Radice(R.R.P)로 특허를 얻은 이후, 오늘날 R.R.P.는 기초, 옹벽, 사면안정, 지지력이 약화된 구조물의 보강 등에 널리 사용되고 있으며 세계적으로 많은 시공사례가 있다.

뿌리 말뚝은 그 중심에 보강재를 가지고 있는 직경 75 ~ 250mm인 소구경의 현장 타설 콘크리트 말뚝이다. 그물식 뿌리 말뚝은 뿌리말뚝을 그물 모양으로 배치하여 흙과 말뚝이 일체로 거동하도록 한 흙-말뚝 복합체를 말한다. R.R.P.의 목적은 여러 방향으로 박힌 뿌리 말뚝으로 형성된 흙-말뚝의 3차원 저항체를 흙속에 만들어 현장 흙의 거동을 개선하는 것이다. R.R.P. 구조물은 보강되지 않은 자연토에 비하여 큰 압축 응력에 대한 저항뿐만 아니라 전단응력과 인장응력에 대한 저항력을 가지게 된다. R.R.P. 구조물에서 말뚝을 그물 모양으로 배치하는 목적은 두가지가 있다. 첫째는 흙-말뚝의 복합체가 일체로 거동 시키기 위해서 뿌리말뚝이 흙을 둘러 싸는 것이다. 이때 말뚝의 수와 직경, 근입각도, 말뚝의 배치 등은 해결해야 될 문제와 흙의 역학적 특성에 따라 달라진다. 둘째는 인장력에 저항할 수 있도록 흙-말뚝 구조물에 필요한 보강재를 제공하는 것이다. 따라서, 두가지 목적을 모두 달성하기 위해서는 흙과 말뚝이 일체로 거동할 수 있도록 흙을 억류하고, 다른 토층을 하나로 묶고, 아래토층에 뿌리를 제공하는 데 필요한 말뚝의 수와 직경, 길이, 방향 등을 결정해야 한다.

일반적으로 가는 말뚝을 많이 사용하는 것보다 굵은 말뚝을 적게 사용하는 것이 경제적으로 유리하지만, 해결해야 될 문제의 특성, 현장여건과 비용을 고려해서 결정해야 한다.

## 3. 보강 방향에 대한 기존의 연구

흙에서 보강재의 작용 형태는 흙속에 발생하는 인장응력에 저항하는 것이 아니라 한 방향의 법선 변형률 속도(normal strain rate)를 억제하거나 감소시키는 것이다. 이러한 때 커니즘은 Vidal에 의해 확인되었다. 그림 1의 극점에서 변형률 속도  $\dot{\epsilon} = 0$ 인 두점 A, B를 각각 연결한 선 PA, PB에 대하여 평행한 면은  $\dot{\epsilon} = 0$ 인 면을 나타내며, PA, PB와 연직인 방향은  $\dot{\epsilon} = 0$ 인 두 방향을 나타낸다. 이들 두 방향을  $\alpha, \beta$ 방향이라 한다.  $\dot{\epsilon}_1$  과  $\dot{\epsilon}_3$  방향은  $\alpha, \beta$  방향을 이등분한선의 방향이 된다.  $\alpha, \beta$  방향이 가지는 실제적 의미는 아주 중요하다. 최소 주변형률 속도  $\dot{\epsilon}_3$  를 포함하는 원호에서 법선 변형율은 인장이 되어 보강이 효과적이다.

여러 점에서  $\alpha, \beta$  방향을 연결하면 두개의 곡선군을 얻을 수 있는데 이들을 영확장궤적(Zero extension trajectory) 혹은 영확장특성곡선이라 부르며, 속도특성곡선(Velocity characteristics)이라고 부르기도 한다.

속도특성곡선은 실험을 통하여 얻거나 응력특성곡선으로부터 얻을 수 있다. 파괴는 응력이 모어-쿨롱 파괴기준을 만족할 때 발생하지만, 실제 파괴면은 속도특성곡선을 따라 발생한다. 다시 말하면 응력 변화율의 불연속이 발생하는 응력특성곡선을 따라 파괴가 발생하는 것이 아니라, 속도 변화율의 불연속이 발생하는 속도특성곡선을 따라 실제 파괴면이 형성된다. 이것은 파괴를 한 블록과 인접한 다른 블록간에 큰 상대변위의 발생으로 정의할 수 있기 때문에 더욱 자명해진다.

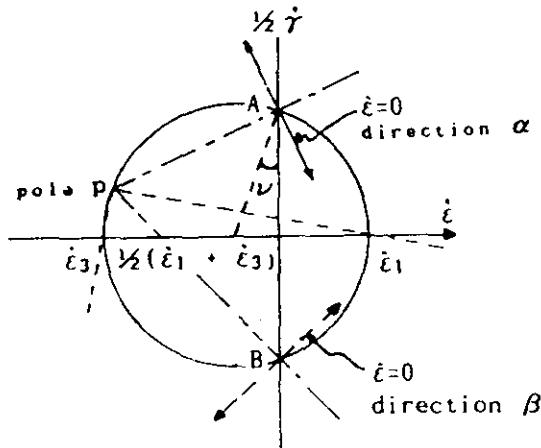


그림 1 변형률 속도의 모어원

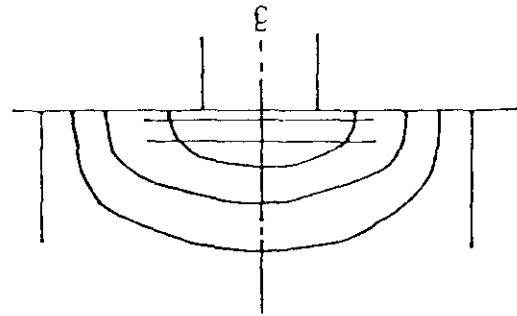


그림 3 이상적인 보강재의 배치형태

그림 2에서 속도특성곡선의 교점에서 볼 수 있는 짧은 선은 법선 변형률 속도(normal strain rate)가 인장이 되어 보강이 효과적인 방향을 나타낸다. 기초에 있어서 가장 이상적인 보강재의 배치방향은 그림 2에 보인것처럼 주 인장 변형률속도( $\dot{\epsilon}_3$ )방향과 일치하게 된다. 여러 점에서의 가장 이상적인 보강재의 배치방향을 연결하면 그림 3에 보인 것처럼 기초의 바로 밑에서는 수평이고, 기초에서 멀어지면서 점차 연직으로 변하는 곡선이 된다. 그러나, 실제에 있어서 그림 3와 같은 형태로 보강재를 배치하는 것이 불가능하므로 그림 4, 5와 같은 보강재 배치모델을 제안하였다. 그림 4는 기존 구조물이 있는 기초를 보강할 때 유용한 보강재의 배치 모델이고, 그림 5는 구조물을 신설할 경우의 기초보강에 적합한 보강재의 배치 모델이다.

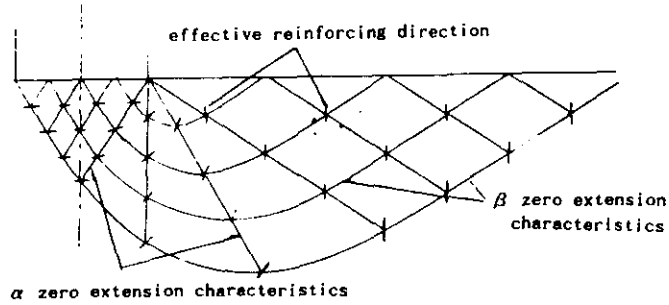


그림 2 조밀한 모래지반에서의 속도특성곡선

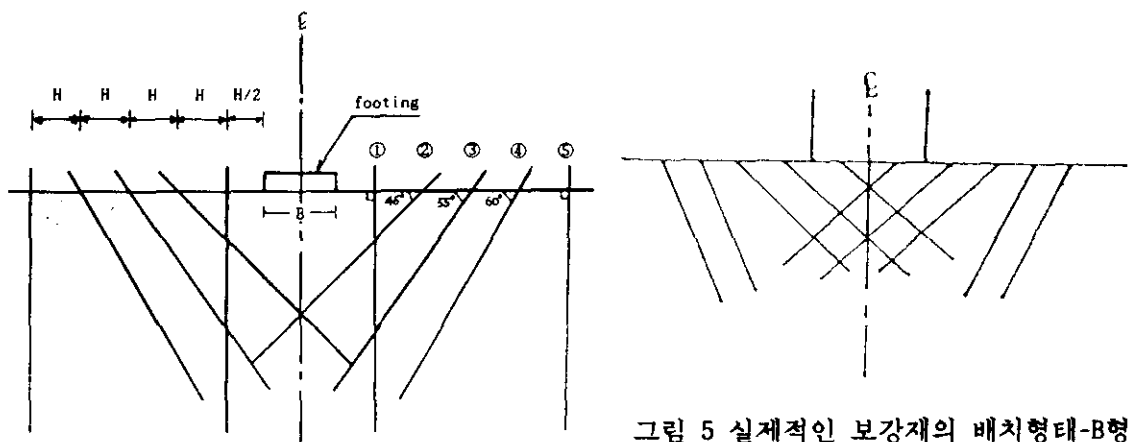


그림 4 실제적인 보강재의 배치형태-A형  
( 표준 보강 )

그림 5 실제적인 보강재의 배치형태-B형

#### 4. Mr. Soil

##### 4.1 Mr. Soil 의 개요

본 연구에서는 유한요소해석을 위하여 일본의 Central Research Corporation (CRC) 社에서 개발한 지반해석용 2차원 유한요소해석 프로그램인 Mr. Soil을 사용하였다. 이 프로그램은 수치계산용 보조프로세서와 EGA모니터를 갖춘 IBM PC AT 호환기종에서 사용할 수 있다. Mr. Soil에서는 동적해석은 불가능하고, 정적 해석만이 가능하다. Mr. Soil에서 사용 가능한 모델에는 완전탄성모델과 탄소성모델이 있다. 탄소성모델은 탄성-완전 소성의 응력-변형률 관계를 따르며, Drucker-Prager 항복기준을 따른다.

프로그램에서 지반은 Isoparametric 사변형요소로 모델링하며, 보강을 위하여 설치하는 말뚝은 보요소(Beam Element)로 모델링한다. 그 외에도 봉요소(Rod Element), 조인트 요소, 하중 상태를 모델링하기 위해서는 집중하중, 분포하중, 중력하중, 초기응력상태, 그리고 성토나 굴착등을 모델링 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

#### 4.2 Mr. Soil 에 의한 지반의 탄소성 해석

많은 지반공학의 대상물은 탄소성 해석시 항복면의 결정이 중요하며 이 항복면을 결정 하는데 있어서 강구조는 Von Mises 와 Tresca 등의 항복기준을 사용하지만, 지반공학에는 Drucker-Prager 와 모어-쿨롱 등의 항복기준을 사용한다.

Mr. Soil에 사용하는 탄소성 모델은 Drucker-Prager 항복기준을 따르며, 탄성해석과의 차이점은 다음과 같다.

(경우 1) Isoparametric 사변형 요소의 재질에서 탄성해석은  $c_p, \phi_p$ 만 사용하나 탄소성 해석에서는 잔류상태의  $c_r, \phi_r$ (즉,  $\alpha_r, \kappa_r$ )을 같이 고려해 주어야 한다. MR. SOIL의 프로그램에서는 흙의 응력특성에 따라서 탄성일 경우는 0, 탄성-완전소성일 경우는 1, 탄성-소성(softening)일 경우는 2로 정의된다. Drucker-Prager식의 매개변수  $\alpha, \kappa$ 는 다음과 같은 관계로 관련지어진다.

$$\alpha = \frac{\tan \phi}{\sqrt{9 + 12(\tan \phi)^2}}, \quad \kappa = \frac{3c}{\sqrt{9 + 12(\tan \phi)^2}}$$

(경우 2) 하중조건의 정의

탄소성 해석시 최대 반복 회수는 하중의 크기에 따라서 달라진다. 본 연구에서는 하중이 300KN/m<sup>2</sup>이므로 1000번 반복시켜 계산과정에 지정한 수렴치 이내가 되면 계산을 끝나게 하였다. 수렴허용오차는 불균형 하중의 절대값으로 보통 하중/최대반복회수 의 비가 0.1-0.001이나 본 연구에서는 4로 하였다. 중력하중은 처음에 외력이 작용하지 않는 상태에 중력하중만 작용하는 것으로 해석한 다음, 그 결과치를 초기응력으로 적용시켜 하중과 같이 해석을 수행하였다.

(경우 3) 본 연구의 문제점

본 연구에서 흙-뿌리말뚝이 복합체가 되어 3차원적으로 거동하는 것을 2차원적인 거동으로 해석하기 때문에 뿌리말뚝이 길어짐에 따라 서로 겹치는 현상이 발생한다(그림 4). 이런 문제를 극복하기 위해서 BEAM요소의 절점 번호를 중첩시키지 않는 방법으로 3차원 해석에 접근시켰다.

### 5. 수치해석

#### 5.1 수치 해석 계획

본 연구에서 띠 기초(strip footing)에 뿌리말뚝을 사용할 경우, Bassett 와 Last가 제안한 보강패턴을 바탕으로 보강효과를 비교, 판단하기 위하여 뿌리말뚝을 설치하지 않은 지반을 모델링하고(모델명 = R0), Bassett가 제안한 배치 형태에 의한 표준보강패턴(기초 폭=5m, 말뚝길이=25m, 말뚝 열의간격=5m, 1열=90°, 2열=45°, 3열=55°, 4열=60°, 5열=90° : 그림 4)을 모델링한 뒤(모델명=RL4), 보강효과에 영향을 미치는 각각의 인자(즉, 말뚝의 길이, 말뚝의 갯수, 말뚝의 단면적, 말뚝의 탄성계수, 기초와 말뚝 사이의 거리, 말뚝의 근입 각도, 말뚝과 지반의 마찰계수)들을 변화시켜가며, 동일한 하중을 재하했을 때의 침하량을 비교하여 최적의 보강 패턴을 구하고자 한다. 여기서 간격이란 기초단부와 뿌

리말뚝 두부와의 거리를 말한다.

## 5.2 유한 요소 모델

수치해석에 사용된 유한요소모델의 절점 총 수는 131개이며, 사변형 요소의 수는 110개 이고, 좌우 대칭 구조이므로 반쪽만을 모델링하였다. 표1은 사질토 지반과 보강 말뚝에 대한 자료이다.

기초에 300KN/m<sup>2</sup>의 응력을 가했을 때, 무보강 지반에 대한 해석결과의 침하량은 24.15cm이었고, 표준보강패턴 결과는 침하량이 9.78cm이었다.

표 1. 사질토 지반과 보강 말뚝에 대한 자료

	E (KN/m <sup>2</sup> )	$\gamma_t$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\phi_p = \phi_r$	d (cm)	$\nu$	R·D
사질토	50000	15.1	36°		0.3	44(%)
보강 말뚝	206850000	4.081		0.26		

## 6. 해석 및 결과

### 6.1 말뚝의 길이 변화

말뚝의 길이 변화에 따른 보강 효과의 차이를 알기 위하여 표준 보강 패턴으로 말뚝의 길이만을 변화시켜가며, 8개의 모델에 대하여 해석을 실시하였다. 그리고 기초 폭과 말뚝 길이와의 경향을 알아 보기위해 표준보강패턴 하중의 10%와 폭은 2B(=10m), 그외는 표준보강패턴과 같은 조건을 사용하였다. 해석 결과는 표2,3 과 그림6 에 나타나있다.

표 2. 말뚝의 길이 변화에 따른 침하량 ( 표준 보강 패턴 )

모 델	RL0	RL1	RL2	RL3	RL4	RL5	RL6	RL7
길 이	0	5	10m	12.5m	25m	35m	50m	100m
침하량 (cm)	24.15	18.37	13.97	9.93	9.78	8.84	8.52	5.57

표 3. 말뚝의 길이 변화에 따른 침하량

모 델	RLB0	RLB1	RLB2	RLB3	RLB4	RLB5
길 이	0	12.5m	25m	35m	50m	100m
침하량 (cm)	1.90	1.25	1.05	0.95	0.60	0.56

일반적으로 말뚝의 길이가 증가함에 따라 보강 효과는 증가하지만 선형적으로 증가하지는 않는다는 것을 알고있다. 그림 6(a) 수치해석결과, 뿌리말뚝에서도 동일한 보강효과를 보였다. 100m 짜리 말뚝의 경우 기초폭 B 와의 비는 20이고, 말뚝 직경 D 와의 비는 385나 되므로 실제로 100m 짜리 말뚝을 설치한다는 것은 비현실적이며 실제에 있어서 말뚝의 길이는 40m 를 넘지 않는 경우가 대부분이다.

Lizzi는 실험 연구에서 말뚝 길이 30m 이내에서 최대 지지력을 얻을 수 있다고 하였다.

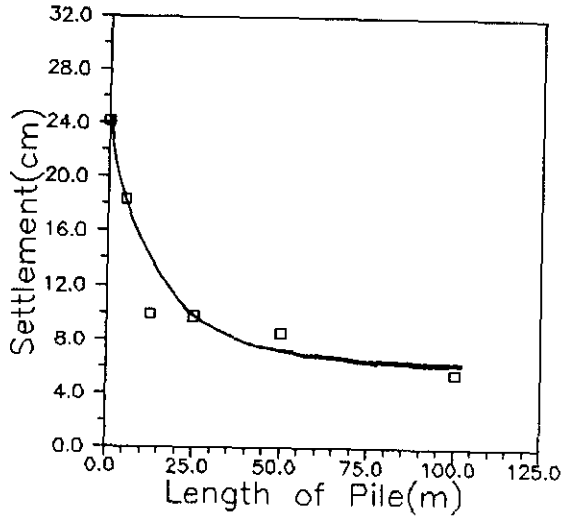


그림 6(a) 말뚝의 길이 변화에 따른 침하량

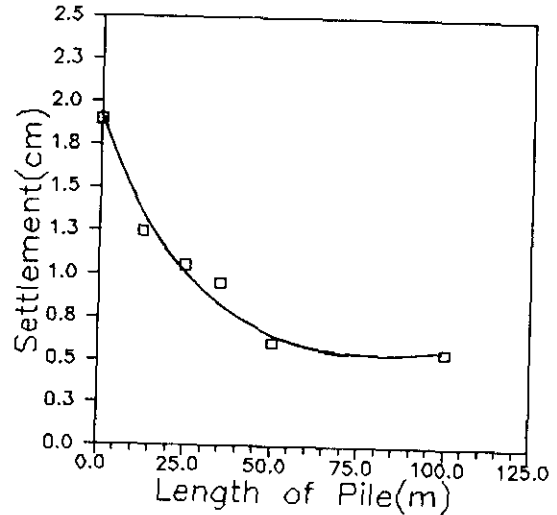


그림 6(b) 말뚝의 길이 변화에 따른 침하량

그러므로 본연구의 해석결과와 Lizzi의 실험 결과 등을 종합하여 보면 시공 가능한 범위에서 되도록 길게하는 것이 좋으나, 최적 길이는 20m 정도라고 할 수 있다. 그리고 그림 6(b)의 최적길이는 40~50m이므로 그림 6(a), (b)를 종합해보면, 기초폭에 대한 뿌리말뚝의 길이 비(L/B)가 4~5정도 이었다.

## 6.2 말뚝의 열의 수 변화

표준보강패턴에는 5개의 말뚝 열이 있다. 각각의 열이 얼마 만큼의 보강 효과를 나타내는지를 알기 위하여 말뚝 길이를 25m, 50m, 100m를 사용하여, 각 길이에 대하여 1열 말뚝만 설치한 경우와 1열~2열, 1열~3열, 1열~4열, 1열~5열까지 설치한 경우를 해석하였다.

표 4. 말뚝의 열의 수 변화에 따른 침하량

모 델	RJ251	RJ252	RJ253	RJ254	RJ255
길 이	25m	25m	25m	25m	25m
열 수	1	2	3	4	5
침하량	21.17	11.33	11.12	11.09	9.08
모 델	RJ501	RJ502	RJ503	RJ504	RJ505
길 이	50m	50m	50m	50m	50m
열 수	1	2	3	4	5
침하량	20.39	10.26	9.82	9.62	8.52

모델	RJ1001	RJ1002	RJ1003	RJ1004	RJ1005
길이	100m	100m	100m	100m	100m
열 수	1	2	3	4	5
침하량	19.00	6.84	6.35	6.11	5.57

말뚝을 1열 설치했을때의 보강효과를 알아보기위해, 각각의 말뚝길이 25m, 50m, 100m에 대해 1열만 설치했을 때와 무보강했을 때와의 침하량 차이는 각각 2.98, 3.76, 5.17cm이었다. 각 말뚝길이에 대해, 1열 말뚝만을 설치했을때와 1열~2열 말뚝을 설치했을 때와의 침하량 차이로 2열 말뚝의 보강효과를 알 수 있는데, 그때 침하량 차이는 9.84, 10.13, 12.16 cm 이었고, 3열 말뚝의 효과를 알아보기위해, 각각의 말뚝길이에 대해서 1열~2열 말뚝을 설치했을 때와 1열~3열 말뚝을 설치했을 때와의 침하량 차이를 계산해 보면 각각 0.21, 0.44, 0.49cm이다. 따라서 그림7 에서 1열~2열 사이의 침하량의 폭이 가장 크므로 2열 말뚝이 가장 큰 보강 효과를 나타내며, 기초로부터 먼 거리에 있는 3, 4, 5열 말뚝은 보강효과가 거의 없다는 것을 알았다. 말뚝의 길이가 길수록 보강효과가 증가하였는데 이것은 경사말뚝인 2, 3, 4열이 기초에 접근하였기 때문이다. 또 길이가 길수록 보강효과도 증가함을 나타내고 있다.

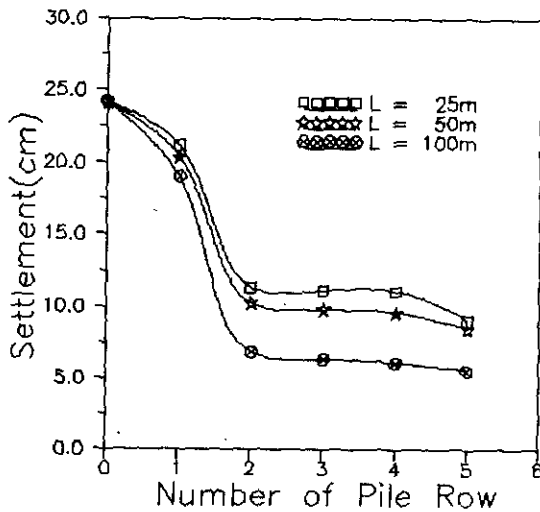


그림 7 말뚝의 열수의 변화에 따른 침하량

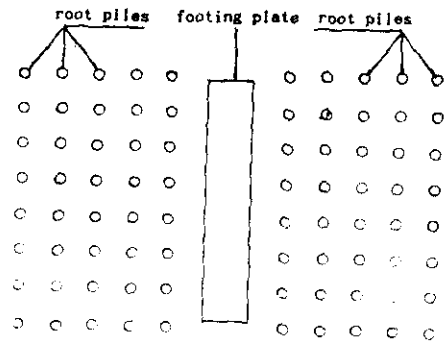


그림 8 (a) 실제 뿌리 말뚝의 배치도

### 6.3 기초의 길이 방향으로 배치된 말뚝의 갯수 변화

기초의 길이 방향으로 배치된 말뚝의 갯수 변화에 따른 보강효과를 알아보기위해 5개 (표5)의 모델을 만들었다. 그림8 과 같이 실제 3차원적인 상황을 고려하기 위하여, 2차원에서의 기초 길이방향으로 배치된 말뚝의 갯수 열의 수가 많을수록 표준보강패턴의 단면적을 증가시키는 것으로 모델링을 하였다. 3차원 해석에서는 말뚝의 단면적의 증가는 말뚝과 흙 사이의 마찰력을 높여주므로 보강효과에 많은 영향을 주지만 본 연구에서는 2차원 해석을 수행했으므로 말뚝의 단면적 변화를 곧바로 마찰력 증가와 연결 지을 수 없다. 보강은



표준보강패틴(RL4)을 기준으로 해석하였고, 표5에서 모델 RA1 은 RL4와 동일하다.

표 5. 기초 길이 방향으로 배치된 말뚝의 갯수 변화 따른 침하량

모 델	RA1	RA2	RA3	RA4	RA5
단면적	1	0.5	0.25	0.125	2
침하량	9.78	10.54	10.80	11.12	9.08

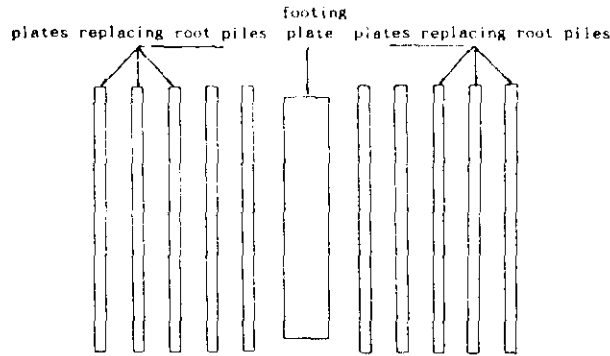


그림 8 (b) FEM에서 가정한  
뿌리말뚝

그림 9의 결과를 보면 말뚝의 단면적의 변화에 따른 보강효과의 차이는 작은것을 알 수 있다. 실제로 말뚝을 설치함에 있어서는 기초의 길이 방향으로 말뚝 사이의 흩이 충분한 아칭(arching)을 발휘할 수 있는 한도 내에서 말뚝간의 거리를 늘릴 수 있다.

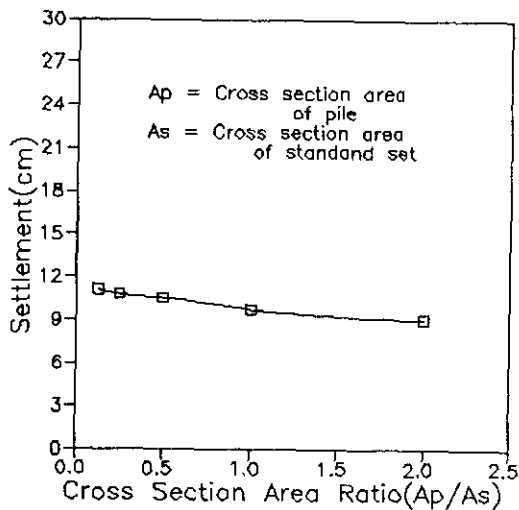


그림 9 말뚝의 단면적 변화에  
따른 침하량

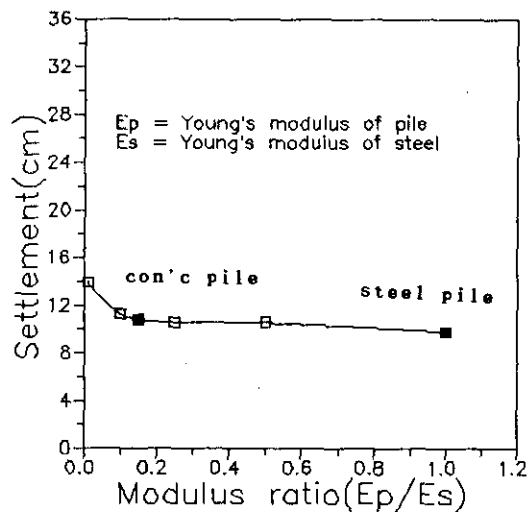


그림 10 말뚝의 강성변화에  
따른 침하량

#### 6.4 말뚝의 강성 변화

표6와 그림10은 말뚝의 강성 변화에 따른 보강효과의 차이를 알기위해 표준보강패턴에서 말뚝의 탄성계수를 변화시켜가며 6개의 모델에 대하여 해석을 한 결과, 강재 말뚝을 사용했을 때와 콘크리트 말뚝을 사용했을 때의 보강 효과 차이는 1.01cm 에 불과하였다.

따라서 강성은 크게 문제가 안되고, 주어진 하중 조건하에서 뿌리말뚝이 부러지지않을 정도의 강성만 지니고 있으면 된다는 것을 알 수 있다.

표 6. 말뚝의 강성 변화에 따른 침하량

모 델	RE1	RE2	RE3	RE4	RE5	RE6
탄성계수	$E_{steel}$	$0.5E_s$	$0.25E_s$	$E_{concrete} = 0.15E_s$	$0.1E_s$	$0.01E_s$
침하량	9.78	10.54	10.57	10.79	11.26	13.94

#### 6.5 기초 단부와 말뚝 두부 사이의 거리 변화

기초 단부와 말뚝 두부 사이의 거리가 멀어질수록 말뚝의 보강 효과가 줄어들 것은 자명한 일이다. 기초 단부와 말뚝 두부 사이의 거리에 따른 보강 효과의 변화를 알기위해 1열의 수직말뚝을 기초로 부터 간격을 바꾸어가며 8개의 모델로 해석하였다. 해석 결과는 표7 와 그림 11에 정리되어있다.

표 7. 기초 단부와 말뚝 두부 사이의 거리 변화에 따른 침하량

모델	RD1	RD2	RD3	RD4	RD5	RD6	RD7	RD11
거리	0	0.25B	0.5B	1.5B	2.5B	3.5B	4.5B	14.5B
길이	25m	25m	25m	25m	25m	25m	25m	25m
침하량	15.02	19.07	21.13	21.51	22.04	22.14	21.98	22.42

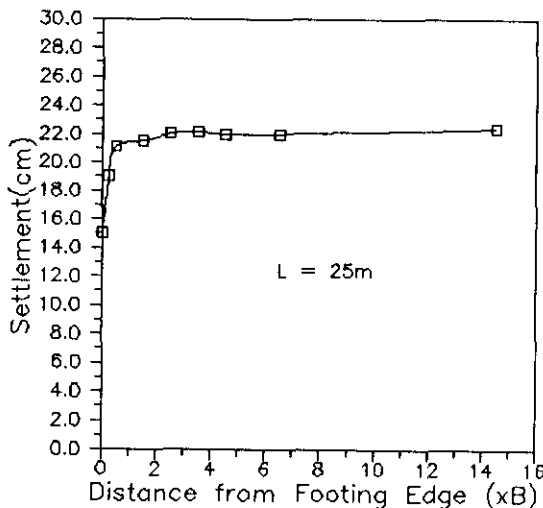


그림 11 말뚝두부와 기초단부사이의 간격 변화에 따른 침하량

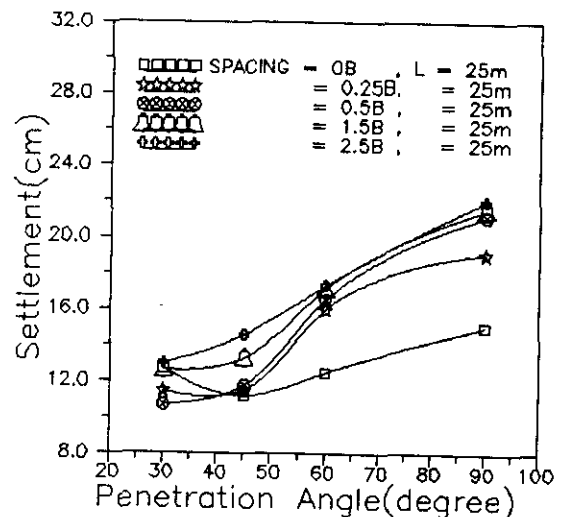


그림 12.a 말뚝의 근입각도 변화에 따른 침하량 (L = 25m)

그림11을 살펴보면 0.5B 내에서는 기초로부터 거리가 멀어질수록 말뚝과 같이 뿌리말뚝도 보강효과가 감소하나, 0.5B 이상의 거리에서는 보강효과가 거의 변함이 없다. 이상의 결과로 연직 뿌리말뚝을 설치할 때는 기초에 가까울수록 보강 효과가 더 좋다.

### 6.6 말뚝의 근입 각도 변화

말뚝의 근입 각도가 보강효과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림13과 같이 한 열의 말뚝만을 설치하여 말뚝의 길이, 간격, 그리고 근입 각도를 변화 시켜가면서 해석을 수행하였다.

해석 결과는 표8과 그림12,14에 정리되어 있고, 그림12는 일정한 말뚝길이에 근입 각도와 간격을 변화시켰을 때 이에 상응하는 침하량을 나타낸 것이다. 그림14은 일정한 말뚝길이와 간격에 대해서 근입각도를 변화시켰을 때 이에 상응하는 침하량을 나타낸 것이다.

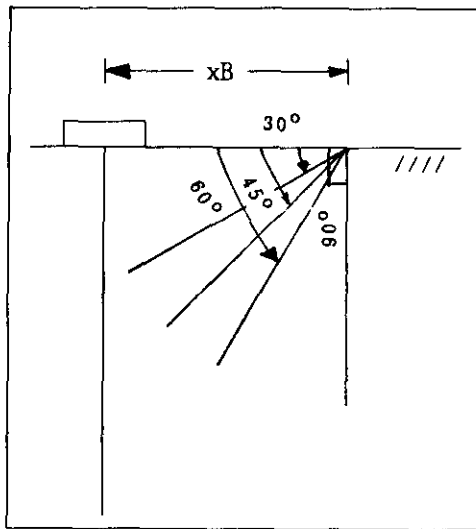


그림 13 근입각도에 대한 배치도

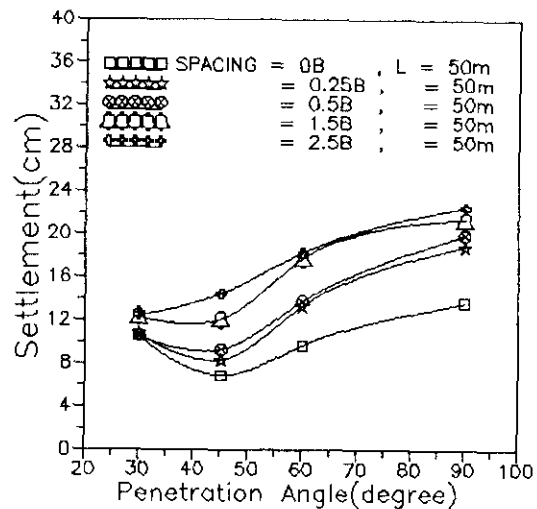


그림 12. b 말뚝의 근입각도 변화에 따른 침하량(L = 50m)

그림14을 살펴보면, 일정한 간격에서 근입각도와 말뚝길이를 변화시켰을때 최대 보강효과를 나타내는 각을 살펴보면,  $L=25m$ 인 경우 0B는 45°, 0.25B는 30°, 0.5B는 30°, 1.5B는 30°, 2.5B는 30°이었고,  $L=50m$ 인 경우 0B는 45°, 0.25B는 45°, 0.5B는 45°, 1.5B는 45°, 2.5B는 30°이었다. 그리고 45°, 60°, 90°의 근입각도에 대해서 간격을 변화시켰을때 기초에 가깝게 배치된 것이 멀리 배치된 것보다 보강효과가 크게 나타났다. 30°의 근입각도에 대해서 기초쪽의 0.5B까지는 기초로부터 거리가 멀어짐에 따라 침하량이 감소하다가 0.5B이상의 거리에서는 침하량이 증가하는 경향을 보였다.

그림 14(a)의 그림에서 표준보강패턴의 간격인 1B, 2B, 3B 그리고 4B, 5B에서 가장 좋은 보강효과를 나타내며, 그 각은 30°이다. 따라서 그림7에서 2열의 기여도 보다 적은 1열, 3열~5열을 30°의 근입각도로 대처하면 좋은 결과를 보일 것이라고 사료되고, 간격이 2B인 2열의 45°가 다른 열의 근입각 보다 훨씬 큰 보강효과를 나타내었지만 30°의 근입각으로 배치하면 더 좋은 결과를 보일것으로 사료된다. 따라서 표준보강패턴에서 최대보강을 나타낸 최적 근입각은 5열 모두가 30°이었고, 이때의 근입각도를 수정 근입각도라 한다.

표 8. 말뚝의 근입 각도 변화에 따른 침하량

모 델	간 격	각 도	길 이	침 하 량 (cm)
RTA1	0	30	25 m	12.71
RTA2	0	45	25 m	11.17
RTA3	0	60	25 m	12.46
RTA4	0	90	25 m	15.02
RTB1	0.25 B	30	25 m	11.45
RTB2	0.25 B	45	25 m	11.49
RTB3	0.25 B	60	25 m	15.97
RTB4	0.25 B	90	25 m	19.07
RTC1	0.5 B	30	25 m	10.69
RTC2	0.5 B	45	25 m	11.77
RTC3	0.5 B	60	25 m	16.50
RTC4	0.5 B	90	25 m	21.13
RTD1	1.5 B	30	25 m	12.63
RTD2	1.5 B	45	25 m	13.26
RTD3	1.5 B	60	25 m	17.11
RTD4	1.5 B	90	25 m	21.51
RTE1	2.5 B	30	25 m	12.99
RTE2	2.5 B	45	25 m	14.54
RTE3	2.5 B	60	25 m	17.29
RTE4	2.5 B	90	25 m	22.04

( 계속 )

모 델	간 격	각 도	길 이	침 하 량 (cm)
RTA5	0	30	50 m	10.59
RTA6	0	45	50 m	6.83
RTA7	0	60	50 m	9.65
RTA8	0	90	50 m	13.61
RTB5	0.25 B	30	50 m	10.71
RTB6	0.25 B	45	50 m	8.27
RTB7	0.25 B	60	50 m	13.33
RTB8	0.25 B	90	50 m	18.88
RTC5	0.5 B	30	50 m	10.53
RTC6	0.5 B	45	50 m	9.24
RTC7	0.5 B	60	50 m	13.77
RTC8	0.5 B	90	50 m	19.92
RTD5	1.5 B	30	50 m	12.33
RTD6	1.5 B	45	50 m	12.03
RTD7	1.5 B	60	50 m	17.75
RTD8	1.5 B	90	50 m	21.34
RTE5	2.5 B	30	50 m	12.42
RTE6	2.5 B	45	50 m	14.42
RTE7	2.5 B	60	50 m	18.29
RTE8	2.5 B	90	50 m	22.48

뿌리말뚝의 근입각에 대한 보강효과를 알아 보기 위하여 표준보강패턴과 표준보강패턴에 수정 근입각을 적용하여 수치해석으로 구한 결과 각각 9.78cm, 8.17cm 이었다. 침하량 8.17cm은 뿌리말뚝 길이가 50m인 표준보강패턴(모델명:RL6)의 침하량(8.52cm) 보다 더 적은 침하량이다. 따라서 길이 25m인 표준보강패턴에 수정 근입각을 적용했을 경우의 보강효과는 표준보강패턴의 말뚝 길이가 50m인 보강효과 보다 더 큰 보강효과를 얻었다. 이 이유

는 보강효과에 대한 기여도가 거의 없는 3~5열의 뿌리말뚝이 기초 밑 혹은 근처에 배치되었기 때문으로 사료된다.

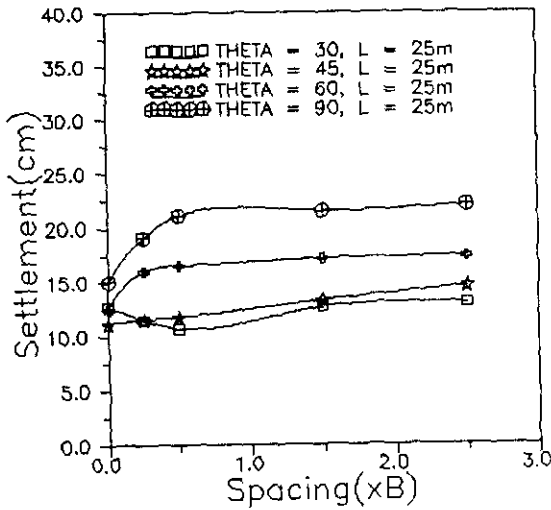


그림 14.a 말뚝의 간격 변화에 따른 침하량(L = 25m)

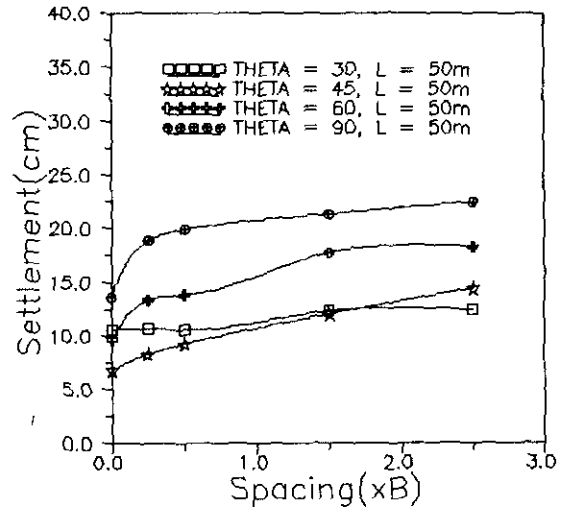


그림 14.b 말뚝의 간격 변화에 따른 침하량(L = 50m)

## 7. 결론

- R.H. Bassett & N.C.Last가 제안한 표준보강패턴 A방법에 뿌리말뚝의 길이를 변화시켜 가면서 띠기초 아래의 사질토 지반을 보강할 때,
  - 말뚝의 길이가 증가함에 따라 보강효과는 증가하지만 선형적으로 증가하지는 않는다.
  - 말뚝의 길이는 시공 가능한 범위까지 되도록 길게하는 것이 좋으며, 표준보강패턴 A에서의 최적 길이는 20m정도였다.
  - 뿌리말뚝 길이와 기초 폭의 비(L/B)는 4~5정도면 좋다.
  - 2열이 가장 큰 보강효과를 보인 반면, 바깥 쪽 3열의 말뚝은 보강효과에 기여하는 바가 거의 없다.
- 기초의 길이 방향으로의 말뚝의 간격은 그 사이의 흙이 충분한 아칭효과를 발휘하여, 말뚝의 각 열이 판처럼 작용할 수 있을 만큼 가까워야 한다.
- 작용 하중 하에서의 말뚝의 강성은 말뚝이 파괴되지 않을 정도의 강성만 있으면 된다고 사료된다.
- 기초 단부와 말뚝 두부 사이의 거리에 따른 보강 효과의 변화를 알기위해 1열의 수직말뚝을 기초의 단부로 부터 간격을 바꾸어가며 해석한 결과, 0.5B 내에서는 기초로 부터 거리가 멀어질수록 보강효과가 감소하나, 0.5B 이상의 거리에서는 보강효과가 거의 변함이 없다. 따라서 수직 뿌리말뚝을 설치할 때는 기초에 가까울수록 보강 효과가 좋고, 0.5B 이상의 거리에서는 보강효과가 거의 변함이 없다.

5. 말뚝의 근입 각도가 보강효과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 한 열의 말뚝만을 설치하여 말뚝의 길이, 간격, 그리고 근입 각도를 변화 시켜가면서 해석한 결과, 기초 중심에서 간격이 1B, 2B, 3B, 4B, 5B인 표준보강패턴의 경우에 대한 최적근입각도는 5열 모두 30°였다.
6. R.H. Bassett & N.C. Last가 제안한 말뚝 길이 25m인 표준보강패턴에 수정 근입각(30°)을 적용했을 경우에는, 말뚝길이가 50m인 표준보강패턴의 보강효과 보다 더 큰 보강효과를 얻었다. 이 이유는 보강효과에 대한 기여도가 거의 없는 3~5열의 뿌리말뚝이 기초 밑 혹은 근처에 배치되었기 때문으로 사료된다.
7. 본 연구는 3차원 거동을 하는 흙-말뚝의 복합체를 2차원 해석을 통하여 연구하였고, 뿌리말뚝의 여러 용도 중에서 특히 띠기초에 국한되어있다. 특히 뿌리말뚝의 용도는 다양하고, 많은 장점을 가지고 있으며, 전망이 밝으므로 앞으로 이에 대한 더 많은 이론적, 실험적 연구가 필요하다고 사료된다.

#### 감사의 글

본연구는 한국과학재단의 1989년도 그물식 뿌리말뚝 설계를 위한 기초적 연구에 대한 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. Bassett, R.H. and Last, N.C., "Reinforcing Earth below Footings and Embankments.", Proc., ASCE, Symp., Earth reinforcement, Pittsburgh, 1978, pp.202-231
2. Lizzi, F., "Root Pattern Piles Underpinning", In Symposium on Bearing Capacity of Piles, Roorkee, India, 1964
3. Lizzi, F., "Special Patented Systems of Underpinning and Subsoil Strengthening by Means of Root Piles(Pali Radice)", Conference donnee a
4. Lizzi, F., "Practical Engineering in Structurally Complex Formations (The In-Situ Reinforced Earth)", International Symposium on the Structurally Complex formations, Capri, Italy, 1977
5. Lizzi, F., "The Leaning Mosul Minaret Restoration Works", Proc. 10th ICSMFE, Vol.4, Stockholm, 1981,
6. Lizzi, F., "The 'Pali Radice' (Root Piles)-A state-of the art Report", Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, 29 Nov. - 3 Dec. 1982
7. Vidal, H., "La Terre Armee", Annales ITBTP, Paris, 1966
8. Vidal, H., "The Principle of Reinforcement Earth", Proc. of the Highway Research Board, N.R.C. and National Academy of Science, Washington, U.S.A., No.282, 1969, pp.1-16
9. Desai, Siriwardane, " Constitutive Law for Engineering Materials ", 1982