

## P - multiplier 방법을 적용한 군말뚝의 수평거동 예측 Prediction For Lateral Behavior of Group Pile Using P - Multiplier

김 병 탁 <sup>1)</sup>, Byung Tak Kim, 김 영 수 <sup>2)</sup>, Young Su Kim

<sup>1)</sup> 경북대학교 토목공학과 공학박사, Ph.D., Dept. of Civile Eng., Kyungpook Nat'l University

<sup>2)</sup> 경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civile Eng., Kyungpook Nat'l University

**SYNOPSIS** : Pile foundations have been widely used in civil engineering construction for many years. Structures subjected to large lateral loads usually have pile foundations as shallow foundations cannot sometimes support the moments on these structure. The purpose of this paper is to propose the  $p$  - multiplier factor ( $P_M$ ) based on the characteristics of behavior of laterally loaded group pile in homogeneous sand. For this, a series of model tests are performed and the composite analytical method proposed by author is used to the propose  $P_M$ . Based on the model test results of the large number of laterally loaded group piles,  $p$  - multiplier factors for homogeneous sand are proposed by back analysis under various condition of soil density, spacing-to-diameter ratio of pile, number of pile, and spacing-to-diameter of pile.  $P$  - multiplier approach provides a simple but sufficient tool for characterizing the shadowing group effects of laterally loaded group pile.

**Keywords** : Group pile, Composite analytical method, Back analysis,  $p$ -multiplier,

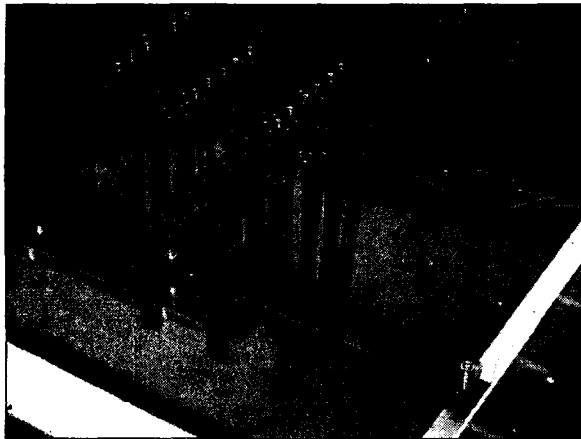
### 1. 서 론

말뚝은 예로부터 토목, 건축의 각종 구조물 기초에 널리 사용되어 오고 있으며, 상부구조물의 하중을 하부 지반에 안전하게 전달시키기 위하여 사용되었다. 연직하중을 받는 말뚝에 대하여서는 일찍부터 연구되어 설계에 유용하게 활용되고 있다. 그러나, 말뚝에 의하여 지지되고 있는 구조물이 토압, 풍압, 파력, 토사유동에 의한 측방토압 등을 받게 되면 말뚝머리에는 연직력뿐만 아니라 수평력과 휨모멘트도 동시에 작용하게 된다. 기존의 말뚝의 설계에서는 이러한 수평력에 대하여서는 검토가 행하여지지 않았다. 그러나, 최근에는 구조물의 대형화로 인하여 수평력을 받는 말뚝에 주목하지 않을 수 없게 되어, 이에 관한 연구가 국내·외에서 최근에도 활발히 진행되고 있는 실정이다.

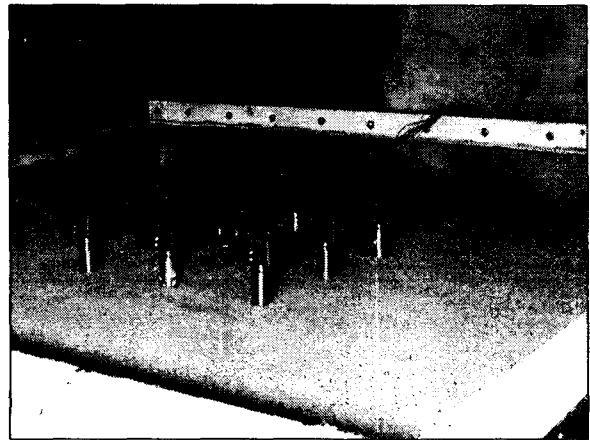
현장에서 시공되는 말뚝은 거의 대부분이 군말뚝으로 시공되고 있으며 이들 군말뚝의 거동은 말뚝-지반-말뚝의 상호작용에 의하여 나타나고 있어 말뚝-지반의 상호작용에 의하여 나타나는 단일말뚝의 거동과는 다르다. 따라서, 기존에 지난 수 십년 동안 단일말뚝의 수평거동을 예측하기 위하여 여러가지의 해석기법들이 제안되어 왔으나, 군말뚝의 수평거동 예측을 위한 간편하며 합리적인 해석기법의 개발이 미진하다 할 수 있다. 지금까지 제안된 방법들 중에서  $p$ -multiplier 기법은 단일말뚝에서 가장 널리 이용되고 있는  $p$  -  $y$  곡선에 군말뚝에서의 말뚝과 말뚝사이에서 작용하는 응력중첩 현상을 고려할 수 있는 지반반력 감소계수( $P_M$ )을 적용하여 수평거동을 예측하는 해석기법으로 최근까지 실무에서 널리 이용되고 있다.

그러나, 국내에서는 군말뚝의 중요성에 비하여 거동특성, 군말뚝 효율 및 하중 분담을 그리고 지반반

말뚝두부에 설치된 고정 판을 제거하고 지반 성형을 완료하였다. 지반 성형을 완료하고 하중 재하판을 설치하기 전의 상태는 사진 1-b와 같다. Traveling spreader법에 의하여 조성된 지반은 상대밀도의 편차가 2%정도로 매우 균질한 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 조성된 지반의 상대밀도의 편차가 ± 3%로 나타났다 (김병탁, 2000).



(a) 지반성형 전



(b) 지반성형 후

사진 1. 군말뚝 모형실험에서 지반성형 전과 후의 장면

### 2.3 모형실험 방법 및 내용

군말뚝의 수평거동은 단일말뚝의 수평거동과는 달리 대부분 말뚝두부가 회전구속 조건으로 시공되고 있다. 본 연구에서 군말뚝의 구속조건은 두부가 회전구속 조건이며 선단부는 자유조건으로 하였다. 말뚝 두부에는 정적 수평하중을 가하였으며 군말뚝에 수평하중이 작용할 경우 각 말뚝두부에 작용하는 수평하중을 측정하기 위하여 변형 게이지를 말뚝 상단부에 2개를 부착하였다. 그리고 말뚝두부에서 회전구속 조건을 만족시키기 위하여 모형말뚝 상부에 말뚝 캡을 설치하고 이들 캡은 다시 군말뚝 수평하중 재하판에 연결하여 재하판의 회전을 막았다. 군말뚝에서 말뚝 배열에 따른 실험을 위하여 재하판에 각 배열에 필요한 말뚝 캡과의 연결 나사구멍을 미리 제작하여 모형실험을 수행하였다. 군말뚝 수평하중은 말뚝 재하판과 같은 레벨에 최대 100kg의 하중을 가할 수 있는 공기압 실린더를 사용하였다. 그리고, 공기압 실린더 전면에 하중계(load cell)를 설치하여 직접 수평하중을 측정하였다. 군말뚝의 수평변위는 하중방향과 평행한 위치에서 군말뚝의 좌우 말뚝 옆에 2개의 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하였다.

군말뚝 수평하중에 의한 각 말뚝에서의 수평하중은 소형 하중계 대신에 변형 게이지로 측정한 변형률( $\epsilon_U, \epsilon_D$ )로부터 구하였으며 각 말뚝에서의 수평하중을 구하는 식 (1)과 같다.

$$Shear = \frac{dM}{dz} = \frac{M_U - M_D}{h} = \frac{\alpha \epsilon_U - \beta \epsilon_D}{h} \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 변형 게이지들간의 거리이며 아래첨자  $U$ 와  $D$ 는 변형 게이지의 상부와 하부표시이고  $\alpha$  및  $\beta$ 는 변형 게이지와 휨 모멘트관계 곡선의 기울기이다.

실험장치들을 성형된 지반에 위치한 말뚝기초에 각각 배치한 후 이들을 단일말뚝의 경우와 같이 MT16 데이터 수집기에 연결하고, 수집한 말뚝기초의 응력 변형률, 수평변위, 그리고 수평하중의 데이터 들은 다시 PC 컴퓨터의 PCMCIA 카드를 통하여 저장된다 (사진 2). 본 연구에서 사용한 말뚝배열 형태는 그림 2와 같은 6가지 종류이며, 군말뚝 모형실험상의 제반조건들은 표 2와 같이 요약할 수 있다.

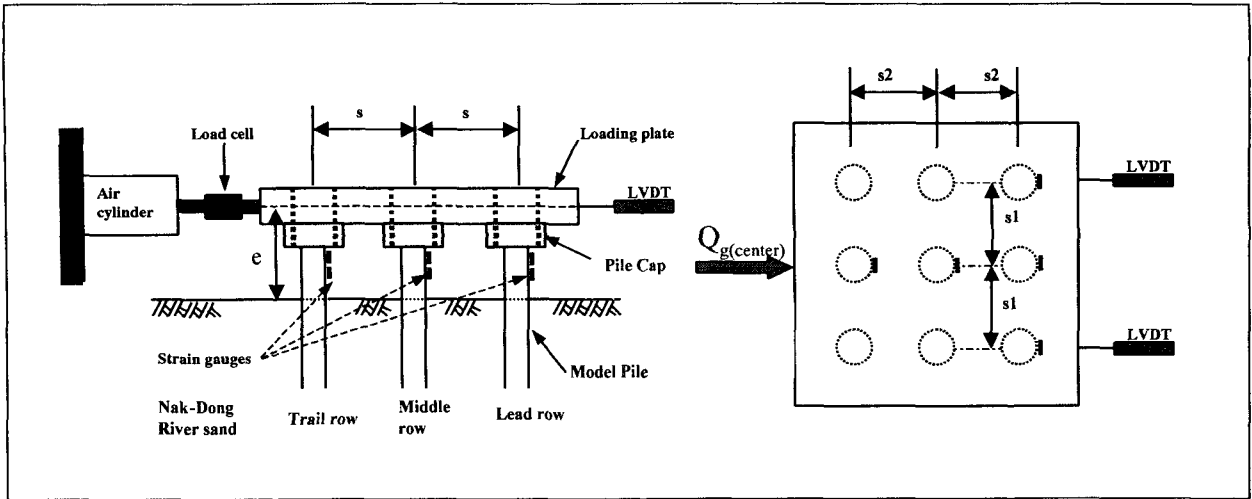


그림 1. 군말뚝 모형실험 장치 개요도

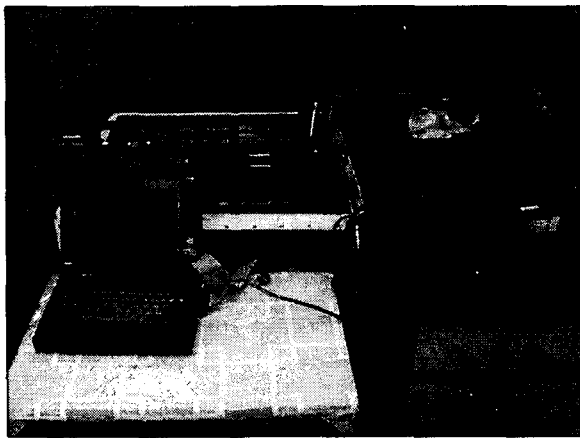


사진 2. 군말뚝 모형실험 전

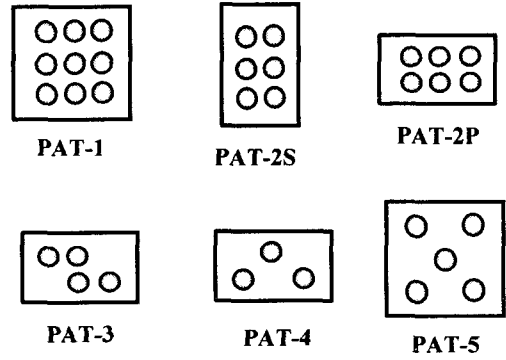


그림 2. 말뚝배열 종류

표 2. 군말뚝 모형실험상의 조건들

영향 인자	말뚝 중심간격 비 ( $S_2/S_1$ , PSR)	말뚝 배열	말뚝 수 (n)	지반 상태	하중재하 방식	말뚝 구속조건	
						두부	선단
모형 실험 조건	$S_2/S_1=1.0$ ( $S/D=3, 4, 6, 8$ )	PAT <sup>1)</sup> -1	3	Homo. ( $D_r=73, 50\%$ )	중심재하	고정단	자유단
		PAT <sup>1)</sup> -2S <sup>2)</sup>	4				
		PAT <sup>1)</sup> -2P <sup>3)</sup>	5				
		PAT <sup>1)</sup> -3	6				
		PAT <sup>1)</sup> -4	9				

<sup>1)</sup> PAT 는 말뚝 배열방식 (pile array type), <sup>2)</sup> S 는 Series arrangement, <sup>3)</sup> P 는 Parallel arrangement

### 3. P - multiplier 해석기법

전형적으로 단일말뚝의 수평거동은 지반에 의한 저항으로 표현되는 비선형 스프링을 갖는  $p - y$  곡

선을 이용하여 해석되어 왔다. 그러나, 군말뚝의 거동은 단일말뚝과는 달리 말뚝간의 상호간섭으로 인하여 단일말뚝의 변위 발생보다 큰 변위 발생이 일어나는데, 이는 말뚝의 수평이동이 지반 강성의 저하를 유발하고 이러한 현상이 다른 말뚝에 영향을 주기 때문이다. 따라서, 군말뚝의 앞 행 말뚝의 하중 분담이 가장 크게 나타나며 중간 행과 마지막 행 말뚝들의 하중 분담은 상대적으로 적게 나타나고 있다. 이러한 현상은 군말뚝의 중심간격이 좁을수록 크게 나타나는데, Brown *et al.*(1988)은 단일말뚝의  $p - y$  곡선에  $p - multiplier$  ( $P_M$ )를 적용하여 지반반력을 감소시켜 군말뚝의 수평거동을 예측할 수 있는 방법을 제안하였다.  $P - multiplier$  은 그림 3에서와 같이 단일말뚝의  $p - y$  곡선을 이용하여 군말뚝의 수평거동을 예측할 경우 수평변위의 과대평가는 필연적이라 할 수 있으나, 말뚝간의 상호간섭 및 지반 반력의 증첩성을 고려하여 지반반력을 감소시킨 군말뚝의 개개말뚝 또는 전체말뚝의 평균적인  $p - y$  곡선을 적용한다면 단일말뚝 보다 큰 수평변위가 발생하는 군말뚝의 거동을 예측할 수 있는 개념이다. 이 개념은 군말뚝의 말뚝간 영향성을 명확히 규명하지 못하고 있는 현실에서는 가장 편리하고 근사적인 예측을 할 수 있는 것으로 알려져 있다.

하지만,  $p - multiplier$  에 대한 연구는 국외의 일부 학자들에 의하여만 수행되고 있으며 국내에서는 설계자들의 인식 부족으로 아직도 이를 이용하는 설계가 전무하다고 할 수 있다. 본 연구에서는  $p - multiplier$  기법을 이용하여 군말뚝기초의 설계시 필요한 지반반력 감소계수 ( $P_M$ )를 국내 낙동강 모래지반의 실험결과들에 근거하여 역해석 방법으로 제안하고자 한다.

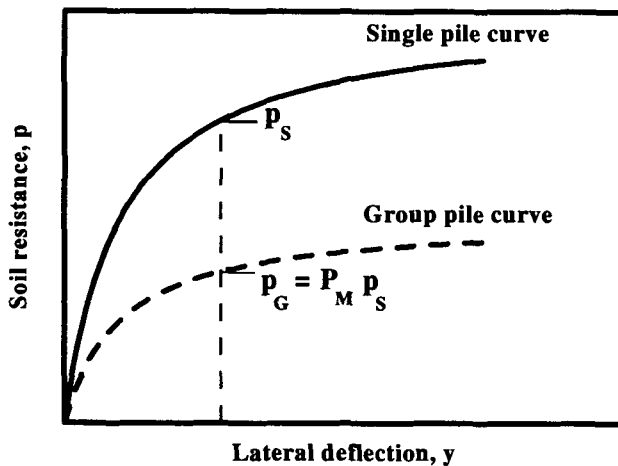


그림 3. 군말뚝에서  $p - multiplier$ 의 개념

기존 연구에서는 탄·소성 지반상의 보 이론과 기초지반을 탄성 스프링으로 간주한 Winkler 해석법을 적용하여 해석하였으나, 본 연구에서는 말뚝을 보 요소로 지반을 탄·소성 스프링으로 모델화 하였는데 말뚝의 유한차분 해석법에 말뚝길이 방향으로의 지반강성 변화를 고려한 해석법인 지반반력 해석법을 적용하여 말뚝의 수평거동을 예측하였다. 그리고, 비균질 지반에서 말뚝의 수평거동을 예측할 수 있는 CAM (Composite Analytical Method)을 본 저자가 제안한바가 있으며 (김병탁, 2000), 본 연구에서는 이 해석기법을 이용하여 군말뚝의 수평거동

을 예측하였다. 본 해석기법은 비선형 해석을 위하여 제안한 Chang의 방법에 말뚝의 경계조건과 연속조건 그리고 지반 - 말뚝의 상호작용을 고려할 수 있도록  $p - y$  곡선을 적용하여 수정 제안한 해석기법이라 할 수 있다. 이 때  $p - y$  곡선은 일련의 연속된 모형실험 결과에 근거하여 낙동강 사질토 지반에 적합한 것으로 밝혀진 Kondner의 함수를 적용하였다 (김병탁, 2000).

#### 4. $P - multiplier$ 에 대한 제안

군말뚝의 수평거동을 예측하기는 상당한 어려움이 있다. 그러나,  $p - multiplier$  방법은 간편성과 지반의 소성변형을 고려하고 있는  $p - y$  곡선을 이용하고 있어 외국에서는 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는  $p - multiplier$  방법에 필요한  $P_M$ 을 모형실험결과들에 근거하여 역해석 방법으로 제안하였다. Brown *et al.*(1988)은 Texas에서 3D간격이고 3×3 배열인 말뚝에 대하여 현장실험을 수행하고 각 말뚝 행에서의  $P_M$  값을 앞 행, 중간 행, 마지막 행에 대하여 각각 0.8, 0.4, 0.3으로 제안하였다. 그리고, Townsend *et al.*(1997)는 Roosevelt 교량에서 4×4 배열 말뚝에 대하여 현장실험을 수행하고 각 말뚝 행

에서의  $P_M$  값을 0.8, 0.7, 0.3, 0.3으로 제안하였다. 또한 McVay *et al.*(1998)는 3D간격이고  $3 \times 3$  배열인 말뚝에 대한 실험결과로서  $P_M$  값을 상대밀도에 따라 제안하였는데, 조밀한 상대밀도에서 0.8, 0.4, 0.3 그리고 느슨한 상대밀도에서 0.65, 0.45, 0.35로 앞 행, 중간 행, 마지막 행의  $P_M$  값을 제안한바가 있다. 이와 같이, 국외에서는 한정된 조건하에서 군말뚝의 각 행 말뚝에 대한  $P_M$  값을 제안하고 있으나, 본 연구에서는 다양한 조건에 대한  $P_M$  값을 군말뚝 전체의 평균값으로 결정하여 제안하고자 한다. 이는 모형실험 동안에 각 행의 하중분담을 모두 측정하지 못하였기 때문이다.

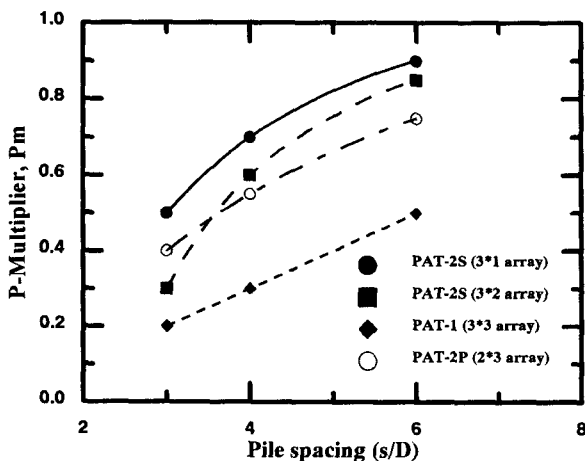
각 상대밀도 지반에서 군말뚝 중심간격과 말뚝 수에 따른  $P_M$ 의 변화를 다양한 말뚝배열 형태에 대하여 결과를 정리하면 각각 그림 4, 5와 같다. 그림 4에서와 같이,  $P_M$ 는 말뚝 중심간격 3D ~ 6D사이에서 급격히 증가하나, 중심간격 6D 이상에서는 거의 완만하게 또는 거의 1.0에 근접하여 나타났다. 이러한 현상은 지반 상대밀도가 클수록 크게 나타났다. 그리고, 말뚝 중심간격이 3D인 경우, 말뚝배열 형태에 따른  $P_M$  값의 범위는  $D_r=73\%$ 와 50%인 지반에서 각각 0.2 ~ 0.5와 0.5 ~ 0.9로 나타났다. 이는 McVay *et al.*(1998)가 제안한  $P_M$  값들과 유사하다고 할 수 있다. 그림 5에서는 말뚝 수가 증가함에 따른  $P_M$ 의 값이 급격히 감소하고 완만하여지는 결과를 보여주고 있다. 이러한  $P_M$  값의 변화는 지반의 상대밀도가 클수록 그리고 말뚝 중심간격이 좁을수록 크게 나타나고 있다. 상대밀도가 느슨할수록 그리고 말뚝 중심간격이 클수록 말뚝 수의 증가에 대한  $P_M$  값의 감소양상이 아주 완만하게 나타났다. 이는 수평하중에 의한 지반반력의 영향범위가 조밀한 지반보다 느슨한 지반에서 상대적으로 좁게 나타남으로 말뚝 수가 증가하더라도 지반반력 중첩의 영향이 크지 않기 때문이다.

본 연구에서는 말뚝 수 (n)와 말뚝 중심간격 (S/D)에 따른  $P_M$  값을 산정할 수 있는 경험식을 실험결과에 근거하여 다음의 식으로 제안하고자 한다.

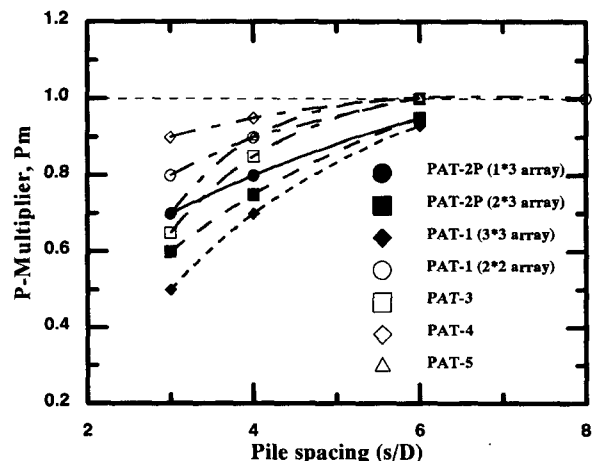
$$\text{For } D_r = 73\% : 2.71(S/D)^{-0.4} n^{-0.238(S/D)^{0.7}} \quad (2)$$

$$\text{For } D_r = 50\% : 0.7(S/D)^{0.357} n^{0.57-0.56\ln(S/D)} \quad (3)$$

그림 6은 말뚝 중심간격비 (PSR)가 달라짐에 따른  $P_M$  값의 변화를 상대밀도 50% 지반과  $3 \times 3$  배열의 군말뚝에 대하여 나타낸 것으로, 말뚝 중심간격 비의 변화에 따른 군말뚝 효율의 변화양상과 거의 비슷하게 말뚝 중심간격비가 증가하면서  $P_M$  값은 감소하여 나타났으며, PSR=1.0, 즉 등간격의 군말뚝에서  $P_M$  값은 최소이고 PSR이 1.0 이상 또는 1.0 이하로 증가함에 따라  $P_M$  값은 증가하는 양상을 나타내었다.

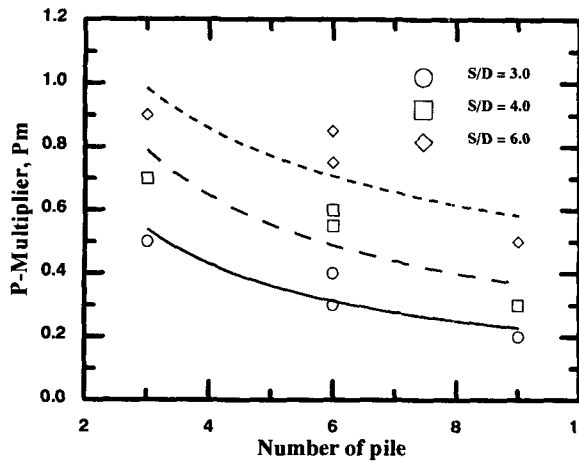


(a)  $D_r=73\%$ 인 경우

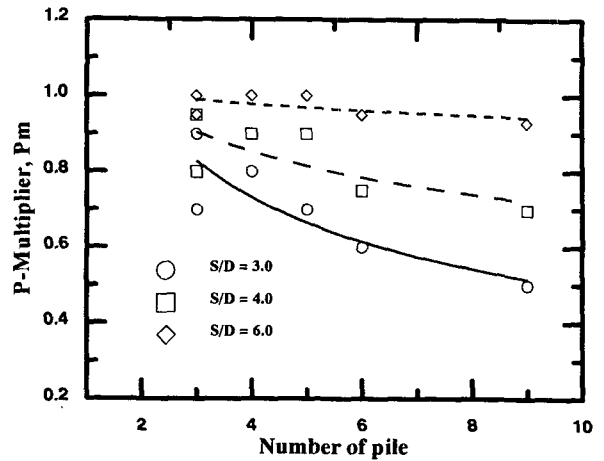


(b)  $D_r=50\%$ 인 경우

그림 4. 각 상대밀도에 대한  $P_M - S/D$  관계 (PSR=1.0인 경우)



(a)  $D_r=73\%$ 인 경우



(b)  $D_r=50\%$ 인 경우

그림 5. 각 상대밀도에 대한  $P_M - n$  관계 (PSR=1.0인 경우)

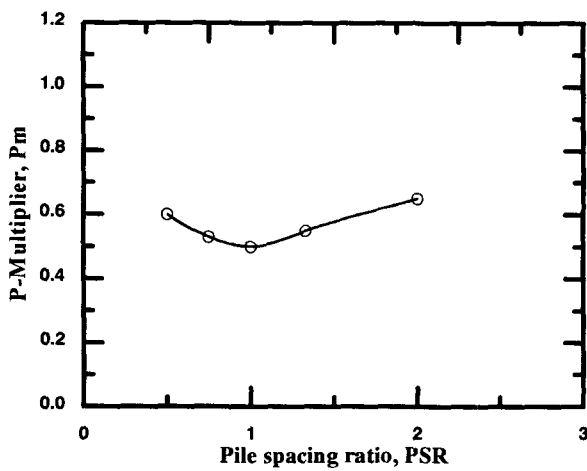


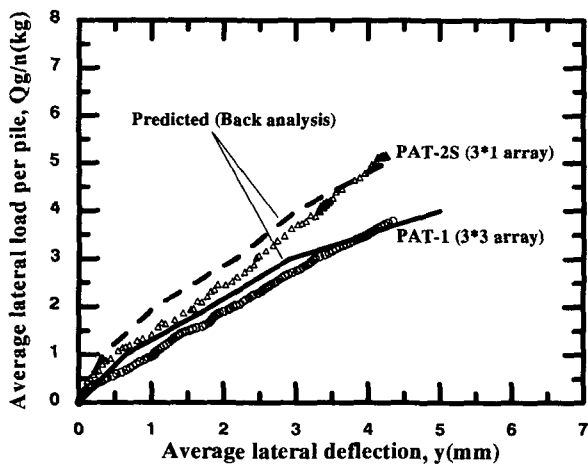
그림 6.  $P_M - PSR$  관계 ( $D_r=50\%$ , PAT-1:  $3 \times 3$  배열)

### 5. $P$ - multiplier에 의한 수평거동 예측

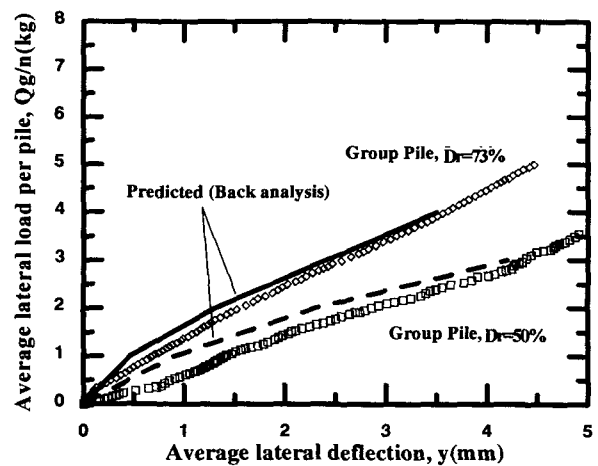
본 연구에서는 비균질지반에 대한 단일말뚝의 비선형 해석을 위하여 제안한 CAM 을 사용하여 군말뚝의 평균 수평하중 ( $Q_g/n$ ) - 수평변위 ( $y$ ) 거동을 예측하였다. 군말뚝의 거동 해석에는 역 해석방법에 의하여 결정된  $P_M$  값을 적용하여 군말뚝에서의 말뚝 - 지반 - 말뚝의 상호작용에 의한  $p - y$  곡선을 수정하였다.

$P$  - multiplier 계수를 고려하여 해석한 군말뚝의  $Q_g/n - y$  관계를 모형실험의 결과와 비교하였으며 그 결과는 그림 7과 같이 나타났다. 그림 7은 말뚝 배열, 지반 상대밀도 그리고 말뚝 중심간격이 각각 다른 경우에 대하여 실험과 해석결과들의  $Q_g/n - y$  관계를 나타낸 것이다.

각각 다른 경우에 대하여 실험과 해석결과들의  $Q_g/n - y$  관계를 나타낸 것이다.



(a)  $S/D=3.0$ ,  $D_r=73\%$ 인 경우



(b) PAT-1;  $3 \times 3$  array,  $S/D=4.0$ 인 경우

력의 감소성에 대한 연구가 거의 없는 실정이다. 이에 본 논문에서는 낙동강 유역의 모래를 이용한 건조지반에서의 군말뚝 수평거동에 미치는 말뚝 수, 말뚝 배열, 말뚝 중심간격, 그리고 지반조건에 대하여 군말뚝 모형실험을 총 57회 수행하고 모형실험 결과들에 근거하여 본 저자가 제안한 복합적 해석기법(Composite Analytical Method, CAM)으로 역해석을 수행하였다. 그리고, 말뚝 중심간격( $s/D$ ), 말뚝 수( $n$ ), 지반 상대밀도( $D_r$ ) 그리고 말뚝 중심간격비 (PSR)에 대한 지반반력 감소계수를 제안하였다.

## 2. 모형실험

### 2.1 모형실험 시료와 모형말뚝

모형실험에서 사용한 낙동강 유역(화원지역)의 모래의 비중은 2.675, 균등계수와 곡률계수는 각각 2.0, 1.23으로 그리고 최대 와 최소 간극비는 각각 1.19와 0.81로 결정되었다. 모형실험에서의 모형 말뚝제원은 표 1과 같은 스테인레스 재질의 강관을 사용하였다. 모형실험에 앞선 모형 말뚝에 대한 검증과 모형말뚝의 표면에 부착한 변형 게이지에 대한 휨 모멘트( $M$ )와 변형율( $\epsilon$ )의 상관관계수( $\alpha$ ,  $M=EI_p \epsilon / y = \alpha \epsilon$ ) 결정은 김병탁 (2000)에서 상세히 설명하였다.

표 1. 모형말뚝의 제원 및 말뚝 구분기준 (무차원 길이 계수,  $\beta L$  &  $\eta L$ , 상대강성계수,  $K_r$ )

직경 (cm)	두께 (mm)	근입길이 (cm)	$\beta^3 L, K_r^3, \eta^3 L$			휨강성 ( $EI_p, \text{kg} \times \text{cm}^2$ )	탄성계수 ( $E_p, \text{kg/cm}^2$ )	항복 휨모멘트 ( $M_y, \text{kg} \times \text{cm}$ )
			$D_r=27.0\%$	50.0%	73.0%			
12.0	0.25	21	0.74 <sup>1)</sup> (R <sup>0</sup> )	0.82 <sup>1)</sup> (R)	1.25 <sup>1)</sup> (R)	3.41	$2.1 \times 10^6$	70.0
			0.18 <sup>2)</sup> (R)	0.12 <sup>2)</sup> (R)	0.03 <sup>2)</sup> (? <sup>0</sup> )			
			1.84 <sup>3)</sup> (R)	1.99 <sup>3)</sup> (R)	2.80 <sup>3)</sup> (?)			

<sup>1)</sup>  $\beta = \sqrt[4]{(E_b/4EI_p)}$  (Chang, 1937);  $E_b$  = 말뚝 직경 깊이에서의 지반반력

<sup>2)</sup>  $K_r = EI_p/E_b L^4$  (Poulos, 1971);  $L$ =말뚝 근입길이;  $E_b$ =말뚝선단부의 지반반력, 즉  $62.65\text{t/m}^2(D_r = 73\%)$ ,  $14.67\text{t/m}^2(D_r = 50\%)$

<sup>3)</sup>  $\eta = \sqrt[5]{(n_b/EI_p)}$ ;  $E_p = 2.14 \times 10^7 \text{ t/m}^2$ ;  $I$  = 말뚝의 단면 2차 모멘트

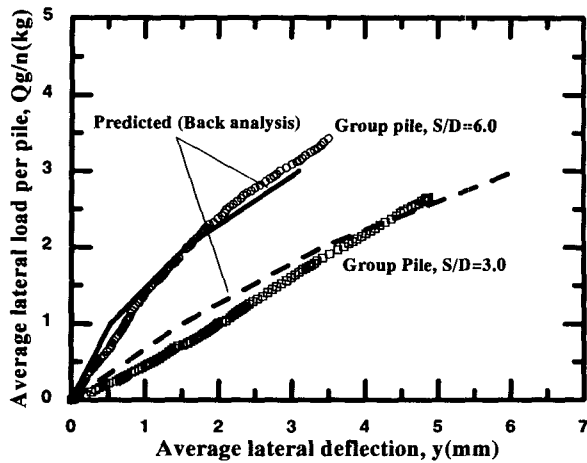
$n_b$  =지반반력상수( $=E_b/D=n_b z^3/D$  at  $z=D$ ), 즉  $1,442\text{t/m}^3(D_r = 73\%)$ ,  $260\text{t/m}^3(D_r = 50\%)$

<sup>0)</sup> R = 강성말뚝 (rigid pile); ? = 강성과 휨성말뚝의 기준값 사이에 존재하며 엄밀하게는 강성말뚝으로 보기 어려움

그리고, Broms(1964), Chang(1937) 그리고 Poulos(1971)는 강성 말뚝과 휨성 말뚝의 구분기준으로 각각 무차원 길이계수( $\beta L$  &  $\eta L$ )와 상대강성계수( $K_r$ )로 제안하고 있으며 (김병탁, 2000), 이 기준들을 근거로 본 연구에 사용한 말뚝의 휨강성을 구분하면 표 1과 같다. 구분기준에 의하면,  $D_r=73\%$  지반에서의  $K_r$  &  $\eta L$  값은 강성 및 휨성말뚝의 기준을 완전히 만족하지는 못하고 있으나 각 기준들에 있어서 강성과 휨성말뚝의 기준값 사이에 존재하며 강성 및 휨성말뚝의 기준값에 더 근접하여 있다.

### 2.2 지반성형

본 연구에서 사용한 사질토 지반의 성형방법은 모래지반의 높은 균질성을 얻을 수 있는 traveling spreader법으로서, 성형한 모래지반의 상대밀도는 모래지반을 성형하기 전에 수 차례에 걸쳐 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계를 반복 실험하여 구하였다 (김병탁, 2000). 군말뚝의 지반성형 및 모형말뚝의 설치방법은 단일말뚝과 동일하게 지반성형 전에 모형말뚝을 사진 1-a와 같이 수직으로 유지한 상태에서 Traveling spreader법으로 지반을 성형하였다. 그리고, 말뚝 근입길이의 50%정도 지반 성형이 완료 된 후



(c) PAT-1; 3×3 array,  $D_r=50\%$ 인 경우  
 그림 7. CAM 해석기법의 결과와 실험결과의 비교 (PSR=1.0인 경우)

본 연구에서 제안한 해석기법에  $p$  - multiplier 기법을 적용한 해석결과는 모형실험결과와 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 낮은 수평하중에서 수평변위에 대한 해석결과는 다소 과소평가 되고 있으나, 수평하중이 증가함에 따라 해석결과는 실험결과와 거의 일치하고 있다.

최근까지도 군말뚝의 거동 예측에  $p$  - multiplier 기법을 이용하고 있는데, 이는 현장에서의 적용상 간편하고, 해석을 위하여 많은 변수가 필요하지 않으며 다양한  $p$  -  $y$  곡선을 많은 학자들이 현장 및 실내 실험을 통하여 제안하고 있어 적용 지반에 적합한  $p$  -  $y$  곡선을 쉽게 선택할 수 있기 때문이다. 따라서, 국내 설계기술자들도 외국 지반에 적합한  $p$  -  $y$  곡선의 감소계수를 사용하기보다는 국내 지반에 적합한 계수를 적용하여 최적의 말뚝 설계를 수행할 필요성이 있다.

## 6. 결 론

대구지역의 낙동강 사질토지반에서 다양한 조건하의 군말뚝 모형실험을 수행하고  $p$  - multiplier 방법에 의하여 군말뚝 수평거동을 예측하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 군말뚝의 수평거동을 예측할 수 있는  $p$  - multiplier 기법을 적용하였으며, 이 기법에서 중요한 지반반력 감소계수( $P_M$ )를 모형실험결과들에 근거하여 제안하였다.
2. 지반반력 감소계수는 상대밀도, 말뚝 중심간격 그리고 말뚝 수에 따라 크게 변화하는 것으로 나타났다. 특히, 등간격 (PSR=1.0)의 군말뚝 배열에서 지반반력 감소계수는 하중직각방향 보다 하중재하방향의 중심간격이 증가하는 경우에서 크게 나타났다.
3. 본 연구에서 제안한 복합적 해석기법에  $p$  - multiplier 기법을 적용한 해석결과는 낮은 수평하중에서 수평변위에 대한 해석결과는 다소 과소평가 되고 있으나, 수평하중이 증가함에 따라 모형실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 국내 설계기술자들도 외국 지반에 적합한  $p$  -  $y$  곡선의 감소계수를 사용하기보다는 국내 지반에 적합한 계수를 적용하여 최적의 군말뚝 설계를 수행할 필요성이 있다.

## 참 고 문 헌

1. 김병탁 (2000), "비균질 사질토 지반에서 말뚝의 수평거동 연구", 박사학위 논문, 경북대학교.
2. Brown, D.A., Morrison, C., and Reese, L.C. (1988), "Lateral load behavior of pile group in sand", *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 114(11), 1261-1276.
3. Kim, Y.S. and Kim. B.T. (1999), "Analysis and Behavior of Steel Pipe Model Pile in Non-Homogeneous Soils", *4<sup>th</sup> Asia-Pacific Conf. Computational Mechanics*, singapore.
4. McVay et al. (1998), "Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands", *J. of Geot. and Geoenvironmental Eng.*, Vol.124, No.10, 1016-1026.