

## 횡방향 변형을 고려한 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가기법 제안

### Suggestion of the Settlement Estimation Method for Granular Compaction Piles Considering Lateral Deformations

황 정 순<sup>1</sup> Hwang, Jung-Soon

김 홍 택<sup>2</sup> Kim, Hong-Taek

김 승 욱<sup>3</sup> Kim, Seung-Wook

고 용 일<sup>4</sup> Koh, Yong-Il

#### Abstract

In cases of the loosely accumulated ground and soft clayey soils, the settlement criterion usually governs in evaluating the stability of structures. The settlement is also a dominant factor to control the design of granular compaction piles mainly applied to the reinforcement of foundation structures in soft ground. In the previous studies, settlement behaviors of granular compaction piles have generally been analyzed with an evaluation of the settlement reduction factor based on the load-sharing ratio and the replacement ratio. In this approach, however, since the reinforced ground with granular compaction piles is simplified as the composite ground, only the difference of a relative vertical strength between piles and soils is taken into account without reflecting lateral behaviors of granular compaction piles. In the present study, the method of estimating the settlement of granular compaction piles is proposed by synthetically considering a vertical strength of the ground, lateral behaviors of granular compaction piles, the strength of pile materials, a pile diameter, and an installation distance of the pile. Further, for the verification of a validity of the proposed method, predicted settlements are compared with results from previous studies. In addition, parametric studies are performed together with detailed analyses of relevant design parameters.

#### 요 지

일반적으로 느슨한 퇴적지반이나 연약한 점성토 지반의 경우 구조물의 안정성 여부는 주로 침하기준에 의해 지배된다. 따라서 연약지반에 주로 적용, 설치되는 조립토 다짐말뚝은 기초구조물 보강이라는 측면에서 접근할 경우 침하량이 설계를 좌우하는 지배인자가 된다. 현재까지 조립토 다짐말뚝의 침하거동에 대한 대부분의 연구성과들은, 조립토 다짐말뚝이 설치된 지반을 복합지반으로 단순화하여 분석을 수행함으로써, 말뚝의 변형시 주로 발생하는 상부영역의 횡방향 거동을 반영하지 못하고 응력분담비로 표현되는 연직방향의 상대강성 차이와 치환율만을 고려한다는 제한성을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 제한성을 보완하는 데 초점을 두어, 말뚝재료의 강성과 직경 그리고 지반의 연직방향 강성과 함께 지반의 횡방향 변형 등을 종합적으로 고려하는 침하량 평가기법을 제안하였으며, 제안된 침하량 평가기법을 기존의 연구성과들과의 비교를 통해 그 타당성 등을 입증하였다. 아울러 제안된 평가기법을 이용하여 조립토 다짐말뚝의 침하에 영향을 미치는 설계변수에 대한 분석을 시행하였으며, 이를 토대로 조립토 다짐말뚝의 설계시 주요 고려사항 등을 제시하였다.

**Keywords :** Granular compaction pile, Lateral deformation, Settlement, Tresca failure criterion

1 (주)한국철도기술공사 지반팀 과장 (Section Chief, Korea Railroad Technical Corporation, opt593@kornet.net)

2 홍익대학교 토목공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ.)

3 농업기반공사 농어촌연구원 (Researcher, Rural Research Institute, KARICO)

4 초당대학교 토목공학과 조교수 (Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Chodang Univ.)

# 1. 서론

기초공학적인 측면에서 구조물과 지반의 안정성은 구조물에 의해 유발되는 하중이 지반의 허용지지력을 만족하는지와 주어진 하중조건에 대해 평가되는 기초의 침하량이 허용치 이내로 수렴하는지에 의해 결정된다. 일반적으로 느슨한 퇴적지반이나 연약한 점성토 지반의 경우에는 주로 침하규준에 의해 구조물의 안정성 여부가 지배되므로, 침하규준을 만족할 경우 지지력도 만족하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 주로 연약지반에 설치되는 조립토 다짐말뚝의 경우, 통상적으로 침하량이 설계지배인자가 되므로, 합리적인 침하량 평가가 매우 중요하다. 조립토 다짐말뚝의 침하량 예측을 위한 대부분의 여러 연구성과들은 주로 응력분담비와 치환율을 토대로 한 침하저감계수의 산정을 위주로 수행되어 왔으며, 이 값을 추정하는 방법들로는 경험적인 방법(Greenwood, 1970; Thorburn, 1975), 해석적인 방법(Priebe, 1976; Aboshi 등, 1979) 등이 있다. 그러나 현재까지 제시된 방법들은 말뚝에 의해 치환된 지반을 복합지반으로 단순화하여 분석을 수행함으로써, 조립토 다짐말뚝의 변형시 주로 발생하는 상부영역의 횡방향 거동을 반영하지 못하고 응력분담비로 표현되는 연직방향의 상대강성 차이와 치환율만을 고려한다는 제한성이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 제한성을 보완하고 보다 합리적으로 침하량을 예측하기 위해 말뚝의 형상과 재료강성, 지반의 연직방향 강성과 함께 Tresca 파괴규준에 부합하는 지반의 횡방향 변형을 고려하는 침하량 평가기법을 제안하였으며, 제안한 침하량 평가기법에 대해 기존의 연구성과들과의 비교를 통해 그 적정성 및 효용성 등을 입증하였다. 아울러 제안한 평가기법을 이용하여, 조립토 다짐말뚝의 침하에 영향을 미

치는 설계변수에 대한 분석을 시행하였으며, 이를 토대로 조립토 다짐말뚝의 설계시 주요 고려사항 등을 제시하였다.

## 2. 조립토 다짐말뚝의 거동특성

### 2.1 침하량 평가에 대한 기존의 연구성과 및 제한성

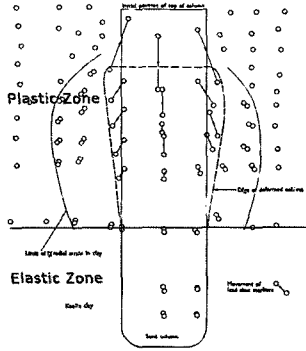
현재까지 조립토 다짐말뚝에 의해 보강이 이루어진 지반의 침하량 평가는 주로 미개량 지반의 침하량( $S$ )에 대한 개량지반 침하량( $S_t$ )의 비를 의미하는 식 (1)과 같은 침하저감계수( $R$ )의 산정을 통해 이루어 졌다. 이 값을 산정하기 위한 대표적인 방법들로는 Priebe Method(1976), Equilibrium Method(Aboshi 등, 1979) 및 Granular Wall Method(Van Impe 등, 1983, 1997) 등이 있으며, 이를 요약정리하면 표 1과 같다.

$$R = S_t / S \quad (1)$$

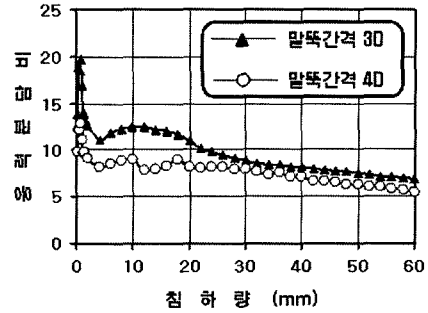
표 1의 제안식 중 Granular Wall Method의 경우, 제안된 평가기법에 의한 변수분석을 통해 침하저감계수의 산정을 위한 도표를 제안하였다. 표 1에 제시된 바와 같이, 기존 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가는 주로 지반 치환율이나 응력분담비를 주된 변수로 하여 산출된 침하저감계수의 산정에 의해 결정된다. 또한 그림 1에 도시된 바와 같이, 하중 작용시 조립토 다짐말뚝의 주된 변형형태는 측방향으로의 팽창이라고 많은 연구자들에 의해 보고된 바 있으며, 응력분담비는 작용하중 수준에 의해 크게 변화하는 것으로 다수의 실험을 통해 입증된 바 있다. 따라서 합리적인 침하량 평가를 위해서는 말뚝의 횡방향 거동과 함께 작용하중의 수준을 고려한 응력분담비의 산정이 매우 중요한 사항이라 판단된다.

표 1. 침하저감계수( $R$ )의 산정을 위한 기존 제안방법

구분	침하저감계수( $R$ )의 산정을 위한 기존 제안방법	제안자	기호 설명
Priebe Method	$\frac{1}{R} = 1 + a_s \left[ \frac{0.5 + F(\nu_s, a_s)}{\tan^2(45 - \phi_s/2) \times F(\nu_s, a_s)} - 1 \right]$ $F(\nu_s, a_s) = \frac{1 - \nu_s^2}{1 - \nu_s - 2\nu_s^2} \times \frac{(1 - 2\nu_s)(1 - a_s)}{1 - 2\nu_s + a_s}, S_t = R \cdot \sigma \cdot l / E_s$	Priebe 등 (1976)	$a_s$ : 치환율 $m$ : 응력분담비 $\nu_s$ : 지반 포아송비 $\phi_s$ : 지반 전단저항각
Equilibrium Method	$R = \mu_c = 1 / \{1 + a_s(m - 1)\}, S_t = R \cdot m_v \cdot \sigma \cdot H$	Aboshi 등 (1979)	$\mu_c$ : 응력저감계수 $H$ : 연약층 두께 $\sigma$ : 작용응력
Granular Wall Method	$R = f(a_s, \phi_p, \nu_s, \sigma / E_s)$ $S_t = R \cdot H \cdot (1 - \nu_s^2) \cdot \left(1 - \frac{\nu_s^2}{1 - \nu_s^2}\right) \frac{\sigma}{E_s}$	Van Impe 등 (1983, 1997)	$E_s$ : 지반 변형계수 $\phi_p$ : 말뚝 전단저항각



(a) 말뚝의 변형(Huges 등, 1974)



(b) 말뚝의 응력분담비 변화(장 등, 2004)

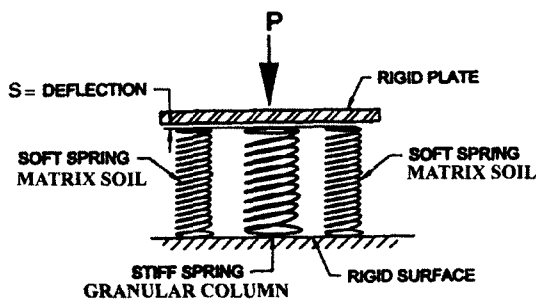
그림 1. 조립토 다짐말뚝의 거동

## 2.2 조립토 다짐말뚝의 횡방향 변형과 응력분담비의 변화

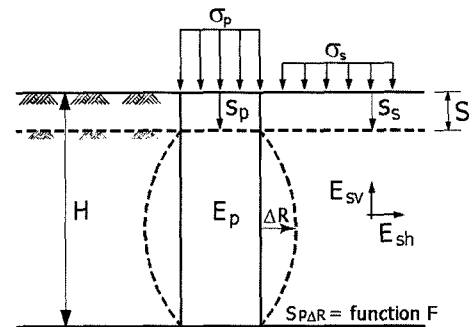
그림 2(a)는 일반적으로 조립토 다짐말뚝의 응력분담 거동을 설명하기 위한 모델이다. 그림 2(a)에서 스프링의 크기는 강성의 차이를 의미한다. 그림 2(a)에 도시된 바와 같이 강성 재하에 의해 균등침하가 발생할 경우, 재하판 하부의 지반과 조립토 다짐말뚝을 이상화한 스프링은 각각의 강성차이에 비례하여 응력을 분담하게 된다. 그러나 일반적인 spring model은 말뚝의 축방향 강성만을 고려하는 경우 유효하며, 그림 2(b)와 같이 말뚝의 횡방향 변형을 고려하는 경우에는 이와는 다른 거동을 하게 된다. 그림 2(b)는 본 연구에서 고려한 조립토 다짐말뚝의 침하 모델이다.

만약 강성재하시 말뚝과 인접한 지반이 작용응력을 분담하고 말뚝이 횡방향으로 팽창한다면, 지반의 침하량( $S_s$ )과 말뚝의 침하량( $S_p$ )은 식 (2)와 식 (3)과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$S_s = \sigma_s \cdot H / E_s \quad (2)$$



(a) 일반적인 Spring Model



(b) 본 연구에서 고려된 침하 모델

그림 2. 조립토 다짐말뚝의 침하거동의 이상화

$$S_p = \sigma_p \cdot H / E_p + S_{p\Delta R} = \sigma_p \cdot H / E_p + F_{(\Delta R)}$$

$$(단, 강성재하시  $F_{(\Delta R)} < S = S_p = S_s$ ) \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_s$ 는 지반으로 분배되는 응력이며,  $H$ 는 연약층의 두께,  $\sigma_p$ 는 말뚝으로 분배되는 응력,  $E_p$ 는 말뚝 재료의 변형계수이고,  $S_{p\Delta R}$ 는 말뚝의 침하량 중 횡방향 변형( $\Delta R$ )에 의해 유발되는 침하성분으로 인접지반의 수평 방향 변형계수( $E_{sh}$ ) 및 지반의 비배수전단강도( $S_u$ ) 등의 함수( $F_{(\Delta R)}$ )이다. 강성재하에 따른 균등침하( $S = S_s = S_p$ )가 정을 토대로 식 (2) 및 식 (3)을 등가라 가정하고 이를 응력분담비로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$m = \frac{\sigma_p \cdot H}{\sigma_s \cdot H} = \frac{E_p}{E_s} - \frac{E_p}{E_s} \cdot f'_{(\Delta R)} = \frac{E_p}{E_s} [1 - f'_{(\Delta R)}] \quad (4)$$

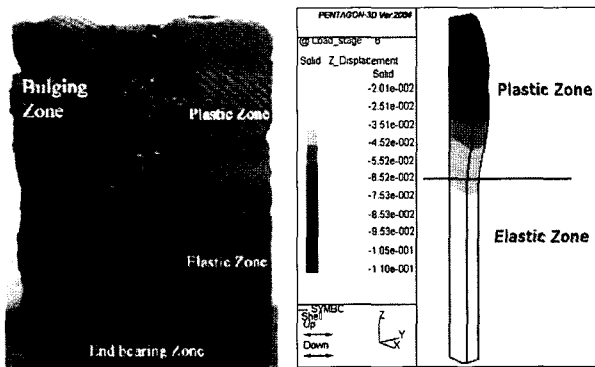
여기서,  $f'_{(\Delta R)} = F_{(\Delta R)} / S_s (0 \leq f'_{(\Delta R)} < 1)$ 로 정의된다. 식 (4)를 통해 응력분담비는 말뚝의 횡방향 변형 정도에 의해 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 그림 2(a)의 spring model과 같이 말뚝의 횡방향 변형을 고려하지 않는 경우( $f'_{(\Delta R)} = 0$ )의 응력 분담비는 작용하중에 관계없이 지반과 말뚝의 강성비에 부합하는 일정한

값을 지남을 알 수 있다. 그러나 이는 그림 1(b)에 도시된 조립토 다짐말뚝의 실험을 통해 구한 전형적인 응력분담비 변화경향에 부합되지 않음을 알 수 있다. 이러한 응력분담비 변화경향은 식 (4)를 통해 설명이 가능하다. 먼저 낮은 작용하중 수준에서는 말뚝의 횡방향 변형이 0에 가까우므로 응력분담비는 지반과 말뚝의 강성비와 유사한 큰 값을 보이게 된다. 그러나 점차 작용하중이 증가하는 경우, 말뚝의 횡방향 변형 또한 증가하여  $f'_{(\Delta R)}$ 을 증가시키므로 식 (4)와 같이 응력분담비는 점차 감소한다. 즉, 실험을 통해 확인되는 응력분담비의 변화 경향은 말뚝의 횡방향 변형과 밀접한 연관성을 가진다. 따라서 합리적인 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가를 위해서는 반드시 말뚝의 횡방향 거동이 고려되어야 함을 알 수 있다. 그러나 현재까지 제시된 방법들은 말뚝이 설치된 지반을 복합지반으로 단순화하거나, 조립토 다짐말뚝의 변형시 주로 발생하는 상부영역의 횡방향 거동 특성을 반영하지 못하고 일정한 응력분담비를 가정하여 분석을 수행하는 제한성이 있다.

### 3. 횡방향 변형을 고려한 침하량 평가기법의 제안

#### 3.1 기본 접근

조립토 다짐말뚝에 대한 재하시험 및 수치해석 등의 수행을 통해, 그림 3과 같은 변형거동이 다수 관찰되어 보고 된 바 있다. 그림 3에 도시된 바와 같이 조립토 다짐말뚝에 하중이 작용하는 경우, 횡방향 변형과 연직방향 침하가 동시에 발생하는 상부소성구역과, 횡방향 변형이 구속되고 연직방향의 변형만이 발생하는 탄성구역으로 구분이 가능하다. 따라서 동일하게 말뚝에 의



(a) 실험결과 (배, 2001) (b) 해석결과 (황, 2004)

그림 3. 조립토 다짐말뚝의 실험 및 수치해석 결과

해 보강이 이루어진 영역일지라도, 상부의 소성구역과 하부의 탄성구역의 침하량 평가방식은 서로 달라져야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 실험 및 해석결과 등을 토대로, 침하량 평가를 위한 구역을 그림 4에 도시된 바와 같이, 크게 말뚝에 의해 보강이 이루어진 상부 보강영역(upper reinforced region)과 하부 비보강영역(lower unreinforced region)으로 구분하였으며, 이중 상부보강영역을 말뚝의 횡방향 거동을 중심으로 소성영역과 탄성영역으로 다시 세분화하였다. 그림 4는 본 연구에서 제안한, 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가를 위한 구역 구분 개요이다.

#### 3.2 가정사항

본 연구에서는 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가를 위해, 다음과 같은 사항들을 가정하였다.

- ① 기초의 재하하중은 지반과 말뚝에 의해 분담된다.
- ② 유효깊이( $L_e$ )를 가상의 지지지반으로 가정하여 상부영역의 침하량을 독립적으로 평가하며, 총 침하량은 가상의 지지지반 이하의 탄성구역(elastic zone)과 하부 비보강영역(lower unreinforced region)에 대해 별도로 평가된 침하량과 상부영역에 대해 평가된 침하량의 합으로 정의한다.
- ③ 말뚝의 인접지반은 Elastic-Perfectly Plastic material이며, Tresca 파괴규준이 성립한다.
- ④ 지표면에서 말뚝 침하량( $S_p$ )과 지반의 침하량( $S_s$ )은 동일하다.
- ⑤ 상부소성영역에 위치한 말뚝의 횡방향 팽창에 의한 체적증가량과 연직방향침하에 의한 손실량( $S_{up1}$ )은 일정하다.
- ⑥ 말뚝은 하중재하시 연직방향으로  $S_{up2}$ 만큼 압축한다. 또한 ⑦ 상부소성영역의 침하량( $S_{up}$ )은

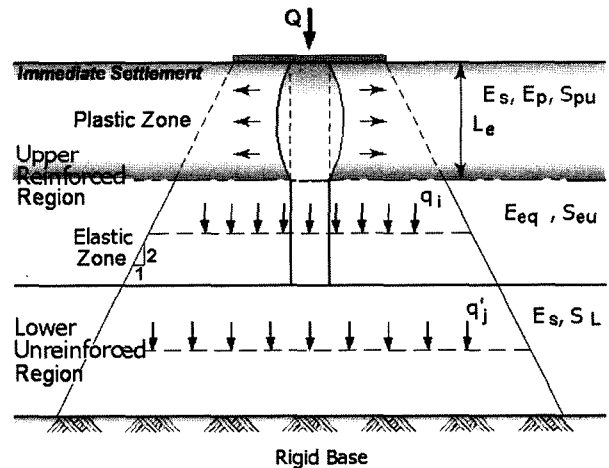


그림 4. 침하량 평가를 위한 구역구분 개요

$S_{up1} + S_{up2}$ 이다.

### 3.3 상부 소성영역의 침하량 산정

조립토 다짐말뚝의 상부소성영역의 침하량 산정을 위한 지반의 횡방향 변형 거동평가는, 주변지반의 항복조건으로 그림 5(a)에 도시된 Tresca 파괴규준을 적용하여 유도되며, 유도과정을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

원통형 공동의 이차원 극좌표계 문제(Two-Dimensional Problems in Polar Coordinates)의 응력-변형관계는 식 (5), (6) 및 (7) 과 같다.

$$\epsilon_r = \partial u / \partial r \quad (5)$$

$$\epsilon_\theta = u / r \quad (6)$$

$$E_s \begin{bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \nu_s^2 & -\nu_s - \nu_s^2 \\ -\nu_s - \nu_s^2 & 1 - \nu_s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,  $\epsilon_r$ 과  $\epsilon_\theta$ 는 각각 방사 및 접선방향의 변형률이며,  $u$ 와  $r$ 은 각각 방사 및 접선방향 변위이다. 또한,  $\sigma_r$ 과  $\sigma_\theta$ 는 각각 방사 및 접선방향 응력이다. Timoshenko & Goodier(1970)는 식 (5), (6) 및 (7)과 같은 평면변형률 조건의 극좌표계 응력-변형률 관계 및 방사 및 접선방향 변형률 정의를 이용하여 탄성상태 응력의 일반식을 제안한 바 있다. 탄소성 상태의 탄성영역(그림 5(b)에서  $r > c$ ) 응력의 일반식은 Timoshenko & Goodier에 의해 제안된 탄성해와 식 (8)의 Tresca 파괴규준,  $Y$ 를 적용하여 식 (9) 및 (10)과 같이 유도된다. 이때, 경계조건으로는  $r=c$ 인 소성영역과 탄성영역 경계면에서의 응력 및 변위의 연속조건을 적용한다. 또한 식 (6) 및 (7)을  $u$ 에 대해 정리하여 식 (9)와 (10)을 대입하면, 식 (11)과 같은 탄성영역의 변위산정식이 유도된다.

$$\sigma_\theta - \sigma_r = Y \quad (8)$$

$$\sigma_r = -\frac{Yc^2}{2b_o^2} \left( \frac{b_o^2}{r^2} - 1 \right) - p_o \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Yc^2}{2b_o^2} \left( \frac{b_o^2}{r^2} + 1 \right) - p_o \quad (10)$$

$$u = \frac{(1 + \nu_s) Yc^2}{2E_s b_o^2} \left[ (1 - 2\nu_s) r + \frac{b_o^2}{r} \right] \quad (11)$$

여기서,  $p_o$ 는 초기응력이다. Tresca 파괴규준을 적용한 이차원 극좌표계의 평형방정식은 식 (12)와 같이 표현된다.

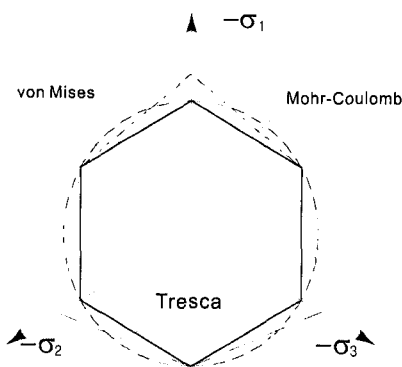
$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = \frac{Y}{r} \quad (12)$$

식 (12)는 일반해와 식 (9)를 이용한 경계면 연속조건에 의해 해를 구하며, 탄소성 상태의 소성영역(그림 5(b)에서  $r < c$ ) 응력의 일반식은 구해진 해와 식 (8)의 Tresca 파괴 규준을 이용하여 식 (13) 및 (14)와 같이 유도된다.

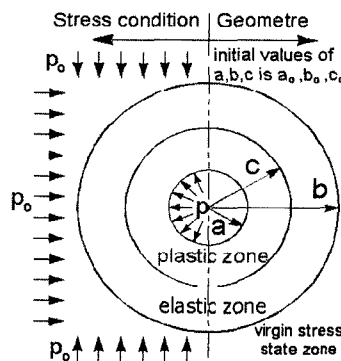
$$\sigma_r = -p_o - \frac{Y}{2} - Y \ln \frac{c}{r} + \frac{Yc^2}{2b_o^2} \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = -p_o + \frac{Y}{2} - Y \ln \frac{c}{r} + \frac{Yc^2}{2b_o^2} \quad (14)$$

Hill(1950)은 지중에 존재하는 토립자의 변위를 산정하기 위해 시간차원의 소성경계면 이동현상을 반영한 해석기법을 제시한 바 있다. Hill의 정의를 이용하여 식 (13) 및 (14)를 정리한 다음, 식 (11)을 이용하여 정의되는 경계면( $r=c$ ) 입자속도를 경계조건으로 공동의 팽창을 정의하면 식 (15)와 같다. 이때, 식 (15)는  $1/b_o = 0$ 이라 가정에 의해 결정되는 식이다. 또한 식 (15)를 하중재



(a) Tresca yield surface



(b) 응력-기하조건

그림 5. 횡방향 거동 평가를 위한 파괴규준 및 조건들

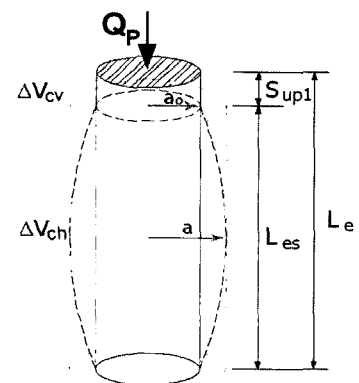


그림 6. 횡방향 변형에 의한 침하개요

하시 조립토 다짐말뚝의 수평방향 팽창에 대한 체적변형률로 정리하면, 식 (16)과 같다.

$$\frac{p-p_o}{Y} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{2G_s}{Y} \left[ 1 - \left( \frac{a_o}{a} \right)^2 \right] + \left( \frac{a_o}{a} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{vp} = 1 - \left( \frac{a_o}{a} \right)^2 = \frac{S_u}{G} \cdot \exp \left\{ \frac{p-p_o}{S_u} - 1 \right\} \quad (16)$$

여기서,  $p$ 는 공벽에 작용하는 응력이며,  $S_u$  및  $G_s$ 는 각각 지반의 비배수전단강도 및 전단탄성계수이다. 침하량 평가의 가정사항 ⑤가 유효하다면, 말뚝의 횡방향 변형에 의한 즉시 침하량은 식 (16)을 적용하여 식 (17)과 같이 정의된다. 그림 4 및 그림 6에 도시된, 식 (17)의  $L_e$ 는 즉시 침하량 평가를 위한 유효깊이로서, 가상의 지지반까지의 거리를 의미하며 하중전이현상을 고려하여 식 (18)에 의해 결정하고, 극한하중에 의한 팽창파괴깊이를 의미하는 한계깊이  $L_c$ 를 최대값으로 설정하였다.

$$S_{up1} = \varepsilon_{vp} \cdot L_e \cdot f_e / \left\{ (1-f_e) \left( \frac{a_o}{a} \right)^2 + f_e \right\} \quad (17)$$

$$L_e = Q_p / 2 a_o \alpha_{ch} S_u \quad (18)$$

여기서,  $a = a_o / \sqrt{1 - \varepsilon_{vp}}$ 이며,  $f_e$ 는 파괴면의 형상가정에 따른 저감계수이고,  $Q_p$ 는 말뚝에 작용하는 하중,  $\alpha_{ch}$ 는 점착력계수로서 Tomlinson 등(Bowles, 1988 참조)에 의해 제안된 값을 적용한다. 가정사항 ⑥에 해당하는 말뚝의 축방향 변형으로 인한 침하량은 말뚝을 단순한 축방향 부재로 가정하여 식 (19)와 같이 간단하게 평가 할 수 있다.

$$S_{up2} = \frac{Q_p L_e}{A_p E_p} \quad (19)$$

여기서,  $A_p$ 는 조립토 다짐말뚝의 단면적을 의미하며,  $E_p$ 는 말뚝 재료의 탄성계수를 의미한다. 식 (17), (18) 및 (19)등에 의해 말뚝의 횡방향 변형을 고려한 즉시 침하량 산정 식은, 식 (20)과 같이 정의된다.

$$S_{up} = S_{up1} + S_{up2} = Q_p \cdot \left[ \frac{\varepsilon_{vp} \cdot f_e}{2 a_o \alpha_{ch} S_u \left\{ (1-f_e) \left( \frac{a_o}{a} \right)^2 + f_e \right\}} + \frac{L_e}{A_p E_p} \right] \quad (20)$$

### 3.4 상부 탄성구역과 하부 비보강영역의 침하량 산정

그림 4의 상부 탄성구역과 하부 비보강 영역의 침하량은, 식 (21)과 같은 일반적인 장기 침하량 산정 식에 의해 결정한다. 이때 조립토 다짐말뚝에 의해 보강이 이

루어지는 영역의 경우 등가 체적압축계수를 적용하였으며, 각 층의 작용하중은 Boussinesq의 방법이나 혹은 2:1분포법 등에 의해 산정한다.

$$S_c = \sum_{k=1}^n q_k m_{vk} \Delta h_k \quad (21)$$

여기서,  $n$ 는 장기 침하량 평가를 위해 세분화한 층의 개수,  $q_k$ 는  $k$ 번째 지층의 중앙에 작용하는 하중,  $\Delta h_k$ 는  $k$ 번째 지층의 두께이며,  $m_{vk}$ 는  $k$ 번째 지층의 체적압축계수이다.

### 3.5 침하량 평가기법

지반에 작용하는 하중,  $q_s$ 에 의한 인접 지반의 즉시 침하량은 식 (22)와 같이 산정된다.

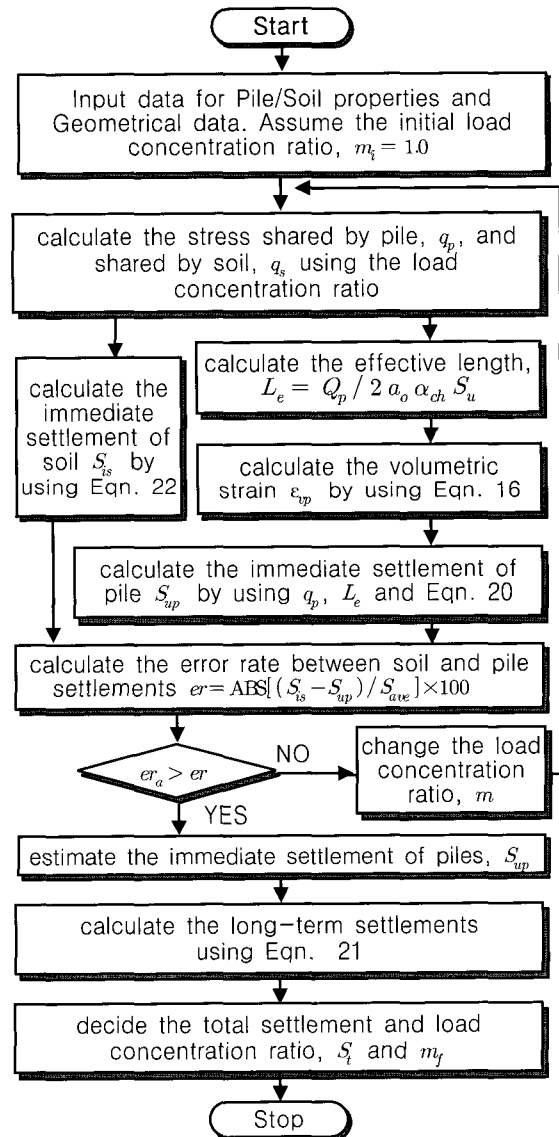


그림 7. 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가 흐름도

$$S_{is} = \mu_o \mu_1 \frac{q_s B}{E_s} \quad (22)$$

여기서,  $B$ 는 기초의 폭이고,  $E_s$ 는 지반의 변형계수,  $\mu_o$ 와  $\mu_1$ 은 침하량 산정을 위한 수정계수이다. 그림 7은 본 연구를 통해 제안하고자 하는 횡방향 변형을 고려한 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가기법에 대한 흐름도 및 각 평가과정에 대한 설명 등이다.

#### 4. 분석 및 고찰

본 4장의 분석 및 고찰에서는 본 연구를 통해 제안한 침하량 평가기법의 검증에 위한 목적으로, 표 1에 정리된 기존 제안식과의 비교·검토를 시행하였다. 또한 제안한 평가기법을 이용하여, 지반조건, 말뚝조건 및 말뚝의 설치형태들을 변화시켜가며 설계인자들이 조립토 다짐말뚝의 침하에 미치는 영향에 대한 다양한 분석을 수행하였다. 본 분석 및 고찰에서 가정한 지반 및 말뚝의 특성치는 표 2와 같다.

##### 4.1 기존 제안식들과의 비교

본 연구에서 제안한 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가

기법의 타당성 등을 평가하기 위해, 본 절 분석에서는 표 1에 제시된 기존의 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정식들과의 비교·검토를 수행하였으며, 분석을 위해 가정한 입력 특성값은 표 2의 대표값과 같다. 다만 본 분석의 경우, 기초의 폭이 5m이며 기초하부의 말뚝이 2×2m의 간격으로 2열 배치된 상황을 가정하였으며, 말뚝길이와 지반의 비배수 전단강도 및 변형계수 비( $E_s/S_u$ )를 표 3과 같이 변화시켜 가며 분석을 시행하였다.

그림 8 및 9는 말뚝의 길이가 5.0m 인 경우이며, 그림 10 및 11은 10.0m 인 경우에 대한 기존 제안식들과의 비교이다.

기존의 제안식들에 의해 산정된 침하량은, Pribe Method 경우가 가장 큰 경향을 보이며, Granular Wall Method 경우가 가장 작은 경향을 보였다. 본 연구에서 제안한 기법에 의한 침하량 평가결과를 살펴보면, 그림 8 및 9에 도시된 바와 같이 연약층의 두께가 비교적 작은 경우에는 Pribe의 방법과 유사한 값을 보였으며, 그림 10 및 11에 도시된 바와 같이 연약층의 두께가 비교적 두꺼운 경우에는 Equilibrium Method와 Granular Wall Method 사이의 값을 보였다. 또한 침하량의 변화 경향을 살펴보면, 본 연구 제안 기법을 포함하여 4가지 방법 모두 대체적으로 유사한 변화 경향을 보였다. 이를 종합

표 2. 조립토 다짐말뚝의 변수분석에 적용된 입력 특성값

구 분	원지반의 강도정수			말뚝 재료의 강도정수			구 분	기타 분석조건		
	범 위	대표값	단위	범 위	대표값	단위		범 위	대표값	단위
단위중량	18.0		$kN/m^3$	23.0		$kN/m^3$	말뚝길이	4.0~10.0	8.0	m
내부마찰각	0.0		°	30.0		°	말뚝직경	1.0		m
점 착 력	20~60	20	$kPa$	0.0		$kPa$	지층두께	4.0~10.0	10.0	m
변형계수	0.8~12.0	4.0	$MPa$	10~50	30	$MPa$	작용하중	10~300	200	$kN/m^2$
포아송비	0.4		-	0.3		-	치 환 율	20~70	20	%

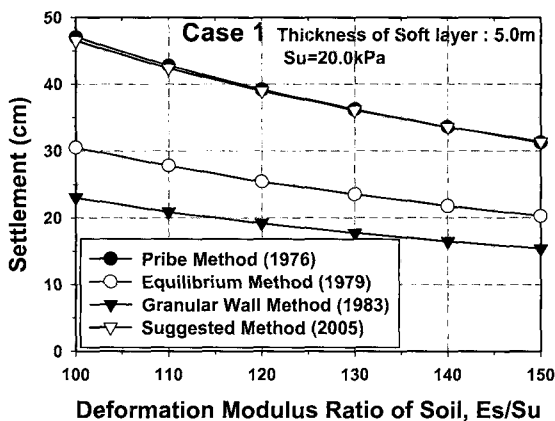


그림 8. Case 1의 비교결과

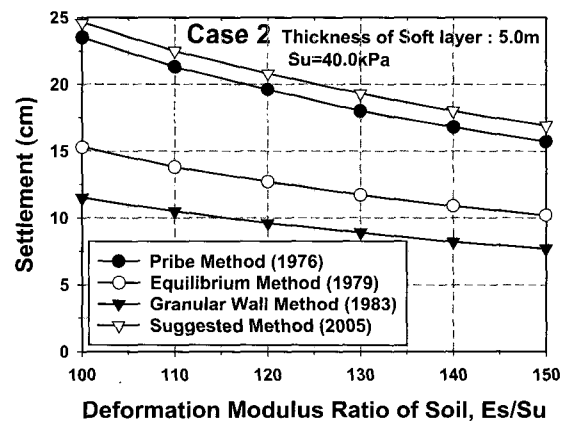


그림 9. Case 2의 비교결과

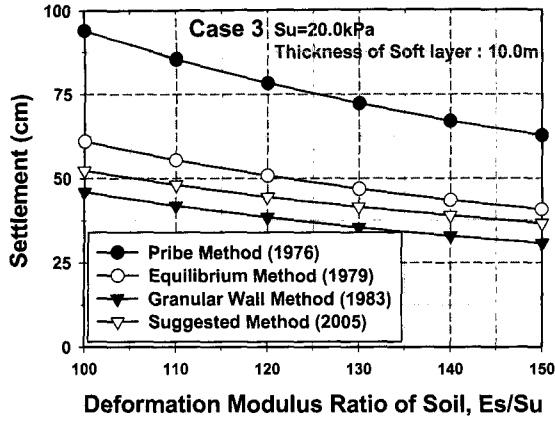


그림 10. Case 3의 비교결과

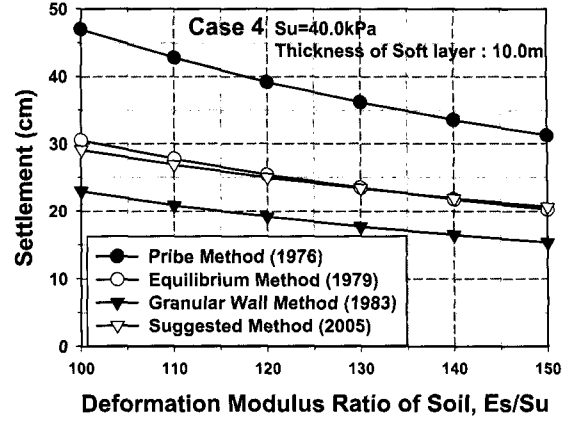


그림 11. Case 4의 비교결과

표 3. 기존 제안식과의 비교·분석에 적용된 특성값

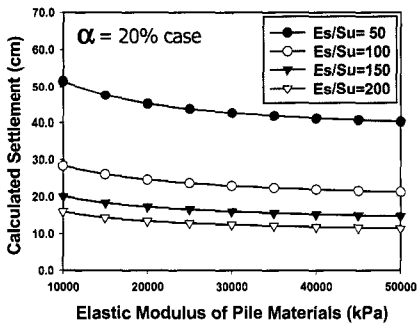
구분	말뚝길이	비배수 전단강도	변형계수비
Case 1	5.0m	20.0 kPa	100 ~ 150
Case 2		40.0 kPa	100 ~ 150
Case 3	10.0m	20.0 kPa	100 ~ 150
Case 4		40.0 kPa	100 ~ 150

할 때, 본 연구에서 제안한 기법에 의해 평가되는 침하량이 비교적 합리적인 범위에 해당함을 확인할 수 있었다. 추가적으로 기존의 제안방법들은 지반과 말뚝의 강도특성 및 형상 등을 동시에 고려하지 못하며, 또한 침

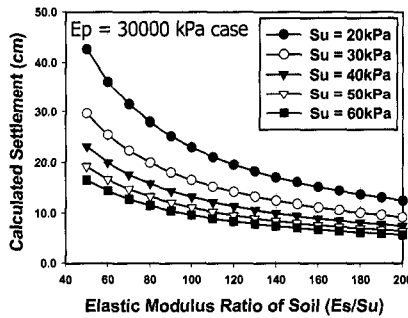
하량의 산출에 적용되는 응력분담율의 경우 설계자가 임의로 가정하여 적용하는 측면을 감안할 때, 본 연구에서 제안한 기법이 보다 정량적이며 다양한 설계조건을 고려가 가능한 합리적인 기법으로 생각된다.

#### 4.2 설계변수 분석

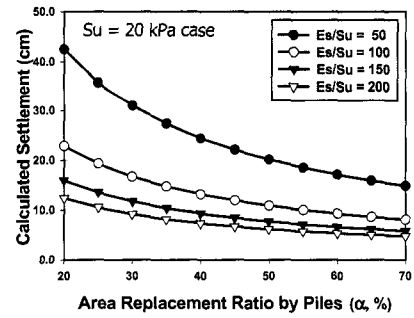
본 분석에서는 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가를 위해 본 연구를 통해 제안한 기법을 이용하여, 지반조건, 말뚝 조건 및 말뚝의 설치형태들을 변화시켜가며, 설계인자들이 조립토 다짐말뚝의 침하에 미치는 영향에 대한 다양한



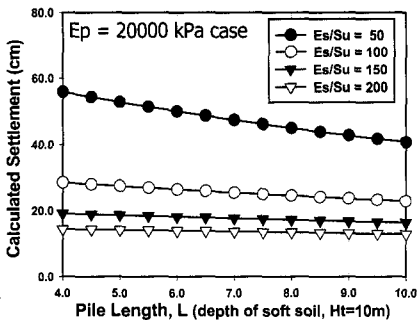
(a) 말뚝의 변형계수 변화에 따른 침하



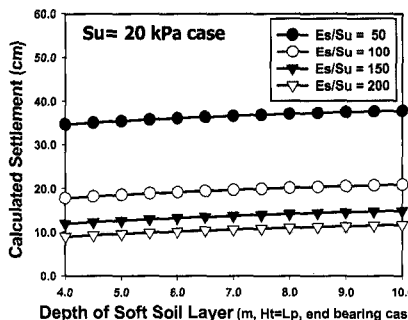
(b) 지반 변형계수비 변화에 따른 침하



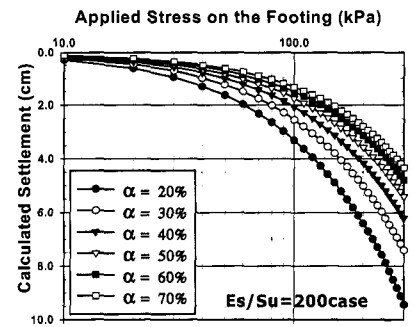
(c) 치환율 변화에 따른 침하



(d) 말뚝의 설치길이 변화에 따른 침하



(e) 원지반의 두께 변화에 따른 침하



(f) 작용응력 변화에 따른 침하

그림 12. 분석조건에 따른 침하거동



분석을 수행하였다. 변수분석에 적용된 특성값들은 아래의 그림 12에 직접 표기하였으며, 표기되지 않은 특성값들은 표 2와 같다. 분석결과는 그림 12에 도시되어 있다.

말뚝 변형계수의 변화에 따른 분석결과(그림 12(a)), 말뚝재료 강성의 감소에 따라 침하량이 다소 증가하나 비교적 미소한 범위에 제한되는 결과를 보였다. 그러나 지반 변형계수의 변화에 따른 분석 결과(그림 12(b))는 침하 발생량의 변화가 매우 큰 결과를 보여, 조립토 다짐말뚝의 침하는 주변지반의 강도에 보다 크게 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 또한 치환율에 따른 침하량 변화 역시 큰 것으로 나타났다(그림 12(c)). 이를 토대로 조립토 다짐말뚝으로 보강된 지반의 침하량은, 말뚝의 재료선정이나 다짐정도 보다는 설치간격에 더 크게 영향 받는다는 사실을 확인하였다.

그림 12(d)는 연약층 두께를 10m로 고정시킨 후 말뚝의 설치깊이를 변화시켜가며 분석한 결과(floating pile case)이며, 그림 12(e)는 말뚝의 길이와 연약층의 두께를 동일한 길이로 변화시켜가며 분석한 결과(end bearing pile case)이다. 본 분석을 통해 지반의 강성이 약한 경우에는 말뚝의 길이변화에 따른 침하량의 차이가 다소 발생하나, 일정정도 이상으로 지반강도가 증가한 경우에는 말뚝의 설치깊이 증가에 따른 침하량의 감소효과가 급격히 감소함을 확인하였고, 조립토 다짐말뚝을 선단지지 형식으로 설치함에 따른 침하 저감효과는 미미한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 현재의 설계관행과 같이, 조립토 다짐말뚝의 선단지지효과를 유발하기 위해, 지지층까지 깊이를 연장하는 것은 비경제적이라는 것을 확인하였다. 그림 12(f)는 작용응력 변화에 따른 조립토 다짐말뚝의 침하거동으로서 일반적인 경향을 나타내고 있다.

## 5. 요약 및 결론

조립토 다짐말뚝의 침하거동에 대한 현재까지의 연구 성과들은 주로 응력분담비와 치환율을 토대로 한 침하저감계수 평가를 위주로 수행되어 왔다. 그러나 현재까지 제안된 기법들은 조립토 다짐말뚝에 의해 치환된 지반을 복합지반으로 단순화하여 분석을 수행하므로, 조립토 다짐말뚝의 변형시 주로 발생하는 상부영역의 횡방향 거동을 반영하지 못하는 제한성이 있다. 본 연구에서는 이러한 제한성을 보완하고자, 말뚝재료의 강성과 직경 그리고 지반의 연직방향 강성과 함께 지반의 횡방향 변형을 종합적으로 고려하는 침하량 평가기법을 제안하였으며, 제안

한 침하량 평가기법에 대해기존의 제안식들과의 비교를 통해 그 적합성 및 효용성 등을 입증하였다. 또한 제안한 기법을 이용한 설계변수 분석을 통해, 조립토 다짐말뚝의 침하거동에 영향을 미치는 인자들에 대한 평가를 수행하였으며, 이를 통해 다음의 분석결과를 도출하였다.

조립토 다짐말뚝으로 보강된 지반의 침하량은 말뚝의 재료선정이나 다짐정도 보다는 설치간격에 더 크게 영향 받는다는 사실을 확인하였으며, 선단지지 형식을 적용하는 것에 따른 침하량 저감 효과는 매우 미미하다는 결과를 통해, 조립토 다짐말뚝의 선단지지효과를 유발하기 위해서는 지지층까지 설치깊이를 연장하는 것은 비경제적이라는 것을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

1. 배우석 (2001), “쇄석말뚝으로 개량된 기초시스템의 지지력 및 침하 특성”, 박사학위 논문, 충북대학교.
2. 장원호, 황정순, 윤지연, 김홍택 (2004), “조립토 다짐말뚝의 거동특성 평가 및 간편설계기법의 제시”, 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집 pp.239-248.
3. 황정순 (2004), “연약지반에 설치된 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 및 침하량 산정기법”, 박사학위 논문, 홍익대학교.
4. Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M., and Harada, K. (1979), “The Compozer, a Method to Improve Characteristics of Soft Clays by Inclusion of Large Diameter Sand Columns”, *Proceeding of International Conference on Soil Reinforcement*, Paris, France, Vol.1, pp.211-216.
5. Bowels, J. E. (1988), “Foundation Analysis and Design”, International Edition”, McGraw-Hill, New York.
6. Greenwood, D. A. (1970), “Mechanical Improvement of Soil below Ground Surface”, *Proceeding of Ground Engineering Conference*, Institute of Civil Engineers, pp.9-20.
7. Hill, R. (1950), “The Mathematical Theory of Plasticity”, Oxford University Press.
8. Hughes, J. M. O., and Withers, N. J. (1974), “Reinforcing Soft Cohesive Soil with Stone Columns”, *Ground Engineering*, Vol.7, No.3, pp.42-29.
9. Priebe, H. (1976), “Estimating Settlements in a Gravel Column Consolidated Soil”, *Die Bautechnik* 53, pp.160-162.
10. Thorburn, S. (1975), “Building Structures Supported by Stabilized Ground”, *Geotechnique*, Vol.25, No.1, pp.83-94.
11. Timoshenko, S. and Goodier, J. N. (1970), *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York.
12. Van Impe, W. F., and De Beer, E. (1983), “Improvement of Settlement Behavior of Soft Layers by Means of Stone Columns”, *Proceedings of 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.309-312.
13. Van Impe, W. F., De Cock, F. D., and Maertens, J. (1997), “Vibro - Compactions and Stone Columns”, *Ground Improvement*, Vol.1, No.3, pp.148-157.

(접수일자 2005. 3. 11, 심사완료일 2005. 4. 19)