

## 쇄석말뚝의 침하량 산정방법 적용성에 관한 연구

### A Study on Applicability of the Calculation Method for Settlement of Stone Column

한 상 수<sup>†</sup> · 정 선 태<sup>1)</sup> · 이 진 형<sup>2)</sup> · 김 보 경<sup>2)</sup> · 김 경 민<sup>2)</sup>

Sangsoo Han · Suntae Jung · Jinhyung Lee · Bokyoung Kim · Kyungmin Kim

Received: September 30<sup>th</sup>, 2015; Revised: October 5<sup>th</sup>, 2015; Accepted: February 19<sup>th</sup>, 2016

**ABSTRACT** : Stone column is the method that replace soft ground such as weak clay and loose sand with gravel or crushed stone which has relatively high stiffness and low compressive. Stone column increases bearing capacity of the soft ground, reduces settlement, produces ground improvement effect by consolidation drain, and is effective to prevent soil liquefaction in sandy ground during an earthquake. Stone column has been used in many civil works, and has recorded quite a lot of construction achievement internationally, but there is no standardized settlement calculation method yet. Therefore, in this study, the applicability of the existing theoretical equations were evaluated through comparison and analysis to predict a reasonable settlement of the Stone column. Consequently, Hook's law formula was verified to be the most close to numerical analysis.

**Keywords** : Stone column, Settlement, Ground improvement, Priebe

**요 지** : 쇄석말뚝공법은 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 쇄석을 연약한 점성토 지반 및 느슨한 사질토 지반에 치환 후 다져 시공함으로써 연약한 지반의 지지력 증가와 침하량 감소, 압밀배수에 의한 지반개량 효과에 더불어 사질토 지반에서는 지진 발생 시 액상화 방지에 효과적인 공법이다. 쇄석말뚝공법은 여러 토목분야에서 활용되고 국제적으로 상당히 많은 시공실적을 보이고 있으나, 아직까지 정형화된 침하량 산정방법은 없다. 따라서 본 연구에서는 쇄석말뚝공법의 합리적인 침하량을 예측하기 위하여 기존에 제안되어 사용되고 있는 침하량 이론식들을 비교·분석하여 적용성을 평가하였다. 그 결과 Hook's law 식이 수치해석과 가장 근접하는 것으로 확인되었다.

**주요어** : 스톤 컬럼, 침하량, 지반개량, Priebe

## 1. 서 론

지상에 설치되는 각종 토목, 건축, 플랜트 등의 다양한 구조물들이 상대적으로 연약한 지반에 놓일 경우 지지력 및 침하 등의 문제가 발생하게 되며 안정성 확보를 위한 연약 지반 처리는 필수적이라고 할 수 있다. 연약지반에 건설되는 구조물의 특성, 건설기간 및 건설비용 등을 고려하여 구조물을 안전하게 지지하는 방법을 모색하여야 한다. 하중을 지중 견고한 층으로 전달하는 말뚝공법 이외에 연약지반 처리방법으로는 치환공법, 탈수 및 배수공법(Vertical drain, Well point, Deep well), 선행재하공법, 고결공법(약액주입, 고압분사, 천층혼합, 동결), 진동다짐공법(모래다짐말뚝(Sand compaction pile), 쇄석다짐말뚝(Stone column))공법 등이 있다. 이 중 진동다짐공법은 원지반의 강도증가 및 시공기간의 단축을 동시에 만족시킬수 있는 공법으로 모래지반에

서는 지지력 증가, 전단강도 증가, 액상화 방지, 수평저항 증가 등을 들 수 있으며 점성토 지반에서는 지지력 증가, 압밀시간 단축, 침하량 저감을 목적으로 한다.

진동다짐공법 중 쇄석말뚝공법은 강성이 크고 압축성이 작은 쇄석으로 지중에 개량체를 형성하여 지반을 보강하는 공법으로 해외에서 상당히 많은 시공실적을 보이고 있으나 국내의 경우 아직 시공실적이 미미한 편이다.

쇄석말뚝의 침하량 산정방법은 수많은 가정에 따라 단순화하여 만든 근사계산법들과 탄소성이론을 기본으로 하는 FEM 해석법을 이용하여 예상침하에 대한 이론이 제안되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 여러 가지 제안된 침하량 공식에 대하여 침하량에 영향을 미치는 주요 설계 파라미터를 분석하고 침하량 제안식에 대한 적용성을 평가하였다.

† Dongah Co. Ltd. (Corresponding Author : [sshan@dage.co.kr](mailto:sshan@dage.co.kr))

1) Dongah Co. Ltd.

2) Samsung C&T Corporation, Engineering & Construction group

## 2. 쇄석말뚝의 침하량 산정 이론

쇄석말뚝 침하량 산정방법은 국가나 기업 또는 제안자에 따라 조금씩 차이를 보이고 있다. 중동의 경우 Schmertmann 제안식, 유럽(영국, 독일 등)의 경우 Priebe 제안식이 주로 적용되는 것으로 조사되었다. 이와 함께 장비제조사인 Bauer사의 침하량 제안식, Vesic의 제안식, Hook's law의 탄성이

론을 정리하면 Table 1과 같다.

## 3. 쇄석말뚝의 침하량 산정 시 주요 설계 Parameter

쇄석말뚝 침하량 산정을 위한 주요 설계 Parameter는 탄

Table 1. Theoretical assessment of stone column settlement

| Theoretical assessment  | Proposer  |
|---|---|
| $s_t = C_1 \cdot C_2 \cdot \Delta P \cdot \sum \left[ \frac{I}{E_n} \right] \cdot \Delta z$ <p> <math>s_t</math> : Settlement, <math>\Delta P</math> : Surcharge load, <math>P_o</math> : Effective overburden load, <math>I</math> : Influence coefficient,<br/> <math>E_n</math> : Modulus of elasticity for each strata, <math>\Delta z</math> : Thickness of each strata,<br/> <math>C_1</math> : Depth correction factor <math>\left[ = 1 - 0.5 \left( \frac{P_o}{\Delta P - P_o} \right) \right]</math>, <math>C_2</math> : Creep factor <math>\left[ = 1 + 0.2 \log \left( \frac{t}{0.1} \right) \right]</math>, <math>t</math> : Time (years)                 </p>  | Schmertmann<br>(Korean Geotechnical Society,<br>2009) |
| $S_t = \frac{S}{n}$ <p> <math>S_t</math> : Settlement, <math>s</math> : Settlement of non-improved ground <math>\left[ = \frac{\Delta P \times H}{E_c} \right]</math>, <math>\Delta P</math> : Surcharge load,<br/> <math>\nu</math> : Poisson's ratio, <math>a_s</math> : Substitution rate, <math>H</math> : Thickness of soft ground,<br/> <math>E_c</math> : Modulus of elasticity for natural ground, <math>n</math> : Settlement improvement modulus<br/> <math>\left[ = 1 + a_s \left( \frac{0.5 + F}{\tan^2(45 - \phi_s/2) \times F} - 1 \right) \right]</math>, <math>F = \frac{1 - \nu^2}{1 - \nu - 2\nu^2} \times \frac{(1 - 2\nu)(1 - \alpha_s)}{1 - 2\nu + a_s}</math> </p>  | Priebe (1976)   |
| $s_t = \frac{P \times H}{E_o}$ <p> <math>S_t</math> : Settlement, <math>P</math> : Surcharge load due to the influence coefficient <math>\left[ = I \times \Delta P / 100 \right]</math>,<br/> <math>I</math> : Influence coefficient, <math>\Delta P</math> : Surcharge load, <math>H</math> : Thickness of soft ground,<br/> <math>E_o</math> : Equivalent modulus of elasticity <math>\left[ = \frac{A_c E_c + A_s E_s}{A_o} \right]</math>,<br/> <math>A_o</math> : Total improvement area(per each column) <math>\left[ = A_c + A_s \right]</math>, <math>A_s</math> : Cross-sectional area of stone column,<br/> <math>E_s</math> : Modulus of elasticity for stone column, <math>A_c</math> : Improvement area of natural ground,<br/> <math>E_c</math> : Modulus of elasticity for natural ground                 </p>  | Bauer   |
| $s_t = \frac{1}{K_s} \times \Delta P$ <p> <math>S_t</math> : Settlement, <math>\Delta P</math> : Surcharge load, <math>K_s</math> : Coefficient of subgrade reaction <math>\left[ = \frac{E_o}{B(1 - \nu^2)} \right]</math>,<br/> <math>\nu</math> : Poisson's ratio, <math>E_m</math> : Modulus of elasticity for mixed ground <math>\left[ = E_c(1 - a) + E_s a \right]</math>,<br/> <math>E_s</math> : Modulus of elasticity for stone column, <math>E_c</math> : Modulus of elasticity for natural ground,<br/> <math>d</math> : Diameter of stone column,<br/> <math>s</math> : Spacing of stone column,<br/> <math>a</math> : Substitution rate <math>\left[ = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \times \left( \frac{d}{s} \right)^2 \right]</math> (Triangular arrangement),<br/> <math>\left[ = \frac{\pi}{4} \times \left( \frac{d}{s} \right)^2 \right]</math> (Rectangular arrangement)                 </p> | Vesic (1961)  |
| $s_t = \Delta P \times B \times \frac{1 - \nu^2}{E_o} \times I$ <p> <math>S_t</math> : settlement, <math>\Delta P</math> : Surcharge load, <math>B</math> : Foundation width,<br/> <math>\nu</math> : Poisson's ratio, <math>I</math> : Influence coefficient,<br/> <math>E_m</math> : Modulus of elasticity for mixed ground <math>\left[ = E_s a + E_c(1 - a) \right]</math>,<br/> <math>E_s</math> : Modulus of elasticity for stone column, <math>E_c</math> : Modulus of elasticity for natural ground,<br/> <math>a</math> : Substitution rate <math>\left[ = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \times \left( \frac{d}{s} \right)^2 \right]</math> (Triangular arrangement), <math>\left[ = \frac{\pi}{4} \times \left( \frac{d}{s} \right)^2 \right]</math> (Rectangular arrangement)<br/> <math>d</math> : Diameter of stone column, <math>s</math> : Spacing of stone column                 </p>              | Hook's law<br>(Korean Geotechnical Society,<br>2009)  |

성계수( $E_m$ ), 기초 제원 등이 있으며 제안식별로 영향을 미치는 인자가 다소 다르다. 일반적으로 Vesic과 Hook's law 식은 기초 폭(B)이 가장 큰 영향을 미치며, Priebe 식을 제외한 모든 제안식의 경우 복합지만 탄성계수( $E_m$ )의 영향을 받는 것으로 평가되고 있다. 이에 본 연구에서는 쇄석말뚝 침하량 산정 시 가장 크게 영향을 미치는 주요설계 Parameter에 대한 분석을 실시하였다.

### 3.1 분석조건

쇄석말뚝 침하량 산정 시 가장 크게 영향을 미치는 주요설계 Parameter에 대한 분석을 위하여 쇄석말뚝 적용 사례가 많은 플랜트 구조물 중 기초 공학적으로 가장 문제가 될 수 있는 위험물(유류, 인화성 물질 등) 저장 Tank 기초

를 대상으로 단면을 가정하였다. Tank 폭(B)은 70m, 하중은  $300\text{kN/m}^2$ , 쇄석말뚝 길이( $H_s$ )는 15m, 말뚝 직경(d)은 1.0m, 간격(s)은 2.2m(치환율 16.2%)로 가정하여 Fig. 1과 같이 적용하였으며 적용된 물성치는 Table 2와 같다.

### 3.2 FEM 해석

본연구는 2차원 유한요소해석(FEM)을 실시하여 이론식 결과와 비교하였다. 유한요소해석은 Midas GTS NX를 사

Table 2. Geotechnical parameters used in this study

|        | $\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ ) | $\phi$ ( $^\circ$ ) | $c_u$ (kPa) | $E_c$ (MPa) | $\nu$ |
|--------|------------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------|
| Ground | 17.0                         | 25                  | 5.0         | 15          | 0.35  |
| Stone  | 18.0                         | 40                  | -           | 180         | 0.35  |

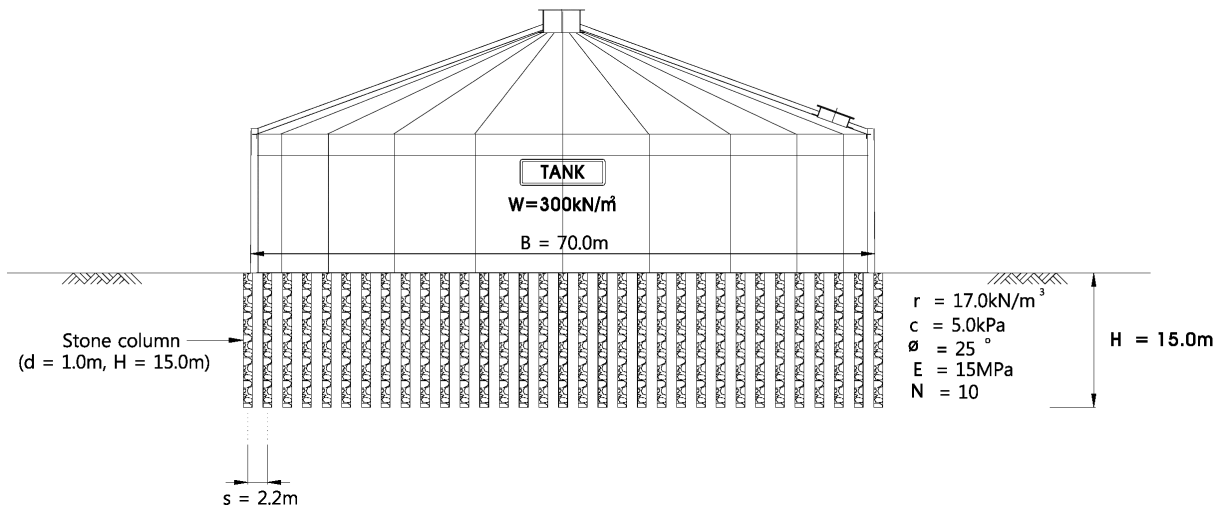


Fig. 1. Schematic model

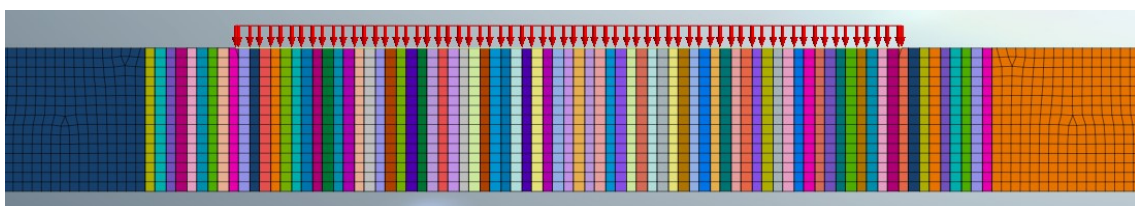


Fig. 2. Modeling

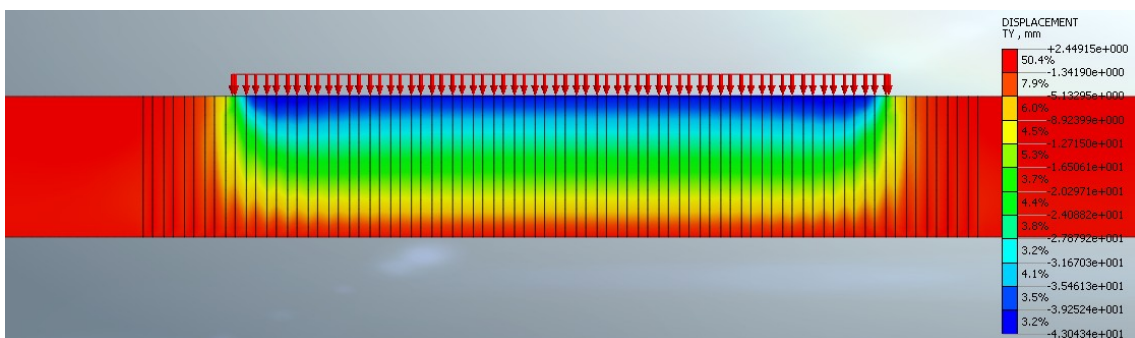


Fig. 3. Finite element analysis result (after improvement)

용하였으며, Mohr-Coulomb 파괴 기준에 따른 탄소성모델을 적용하였다. 해석조건은 이론식 분석조건(지반조건, 탱크하중, 개량깊이 및 범위 등)과 동일하게 적용하여 1) 원지반 + 변위 초기화, 2) 지반 개량(쇄석말뚝 모델링), 3) 강성판모델링(탱크와 같은 재질의 강성판(5mm)을 지반 위에 모델링), 4) 하중재하의 과정으로 진행하였다. Fig. 2와 3은 대표적인 유한요소해석 모델 및 침하량 분포 해석 결과이다.

### 3.3 기초 폭(B)에 따른 영향

Vesic과 Hook's law 식의 경우 여러 설계 Parameter 중 기초 폭(B)이 침하량 산정에 영향을 가장 크게 미치는 것으로 알려져 있다. 그러므로 침하량 산정 시 Vesic과 Hook's law 식에서 Fig. 4와 같은 지층을 고려하지 않고 무조건 기초 폭(B)을 적용한다면, 침하발생 가능한 지층(H)이 기초 폭(B)보다 큰 경우와 기초 폭(B)보다 작은 경우가 동일한 침하량으로 산정될 것이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 Vesic과 Hook's law 식으로 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 침하 가능한 지층 두께(H=15)를 고려하

지 않은 경우(B=70)와 고려한 경우에 대한 침하량 계산 결과를 다른 제안식들과 비교한 결과이다. 침하 가능한 지층 두께를 고려하지 않은 경우, 침하 가능성이 있는 지반의 깊이(H=15)에 비해 기초 폭(B)이 상대적으로 크므로 다른 제안식에 비해 침하량 역시 크게 산정되었다.

Fig. 6은 Vesic과 Hook's law 식의 기초 폭(B=70m)을 침하 가능성이 있는 지반의 깊이(H=15m)로 변경하여 다른 침하량 제안식들과 상호 비교한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 기초 폭 크기가 변경됨에 따라 침하량이 약 300mm에서 350mm 정도 감소하였다. 기초 폭의 영향을 받는 식의 특성상 기초 폭 감소 비율(약 20%) 정도로 침하량도 감소하였다. 또한 이러한 결과는 다른 예측식, 특히 Bauer 식과 유사한 결과로 나타났다. 그러나 유한요소해석 결과 및 Schmertmann 식에 비해서는 2배 이상 큰 값을 예측하고 있다. 검토 결과 Vesic과 Hook's law 식에 적용된 기초 폭(B)은 침하 가능성이 있는 지반의 깊이(H)가 기초 폭(B)보다 작은 경우 침하 가능성이 있는 지반의 깊이(H)로 변경하여 침하량을 산정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

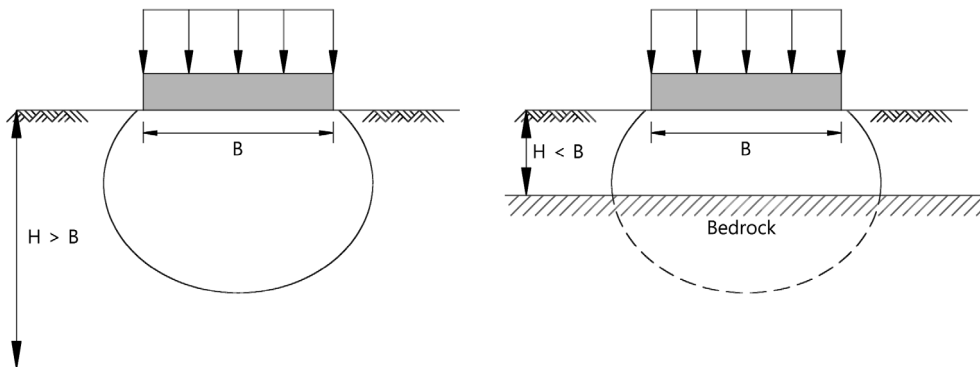


Fig. 4. In case of the depth of the target is different

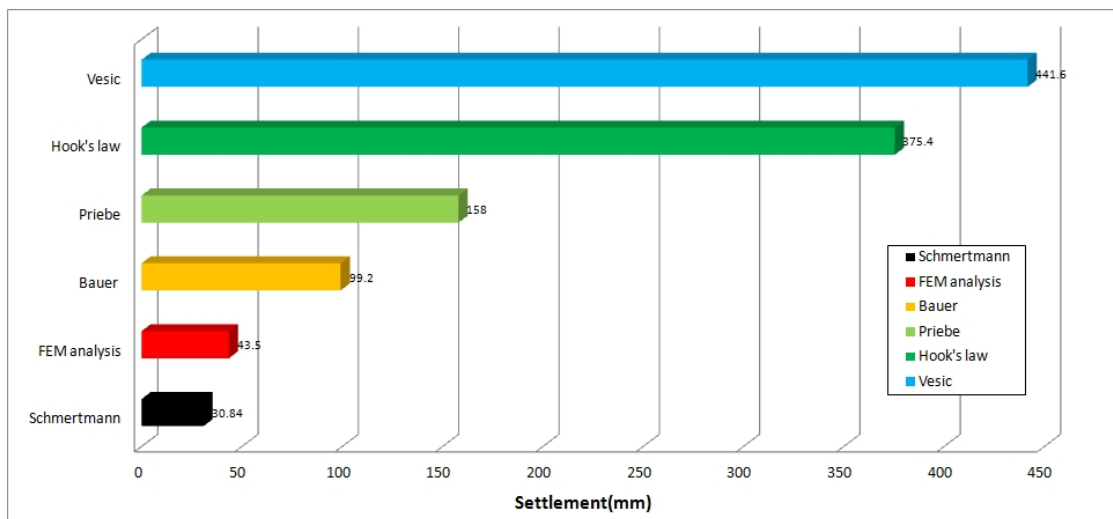


Fig. 5. Settlement results for B=70, H>B

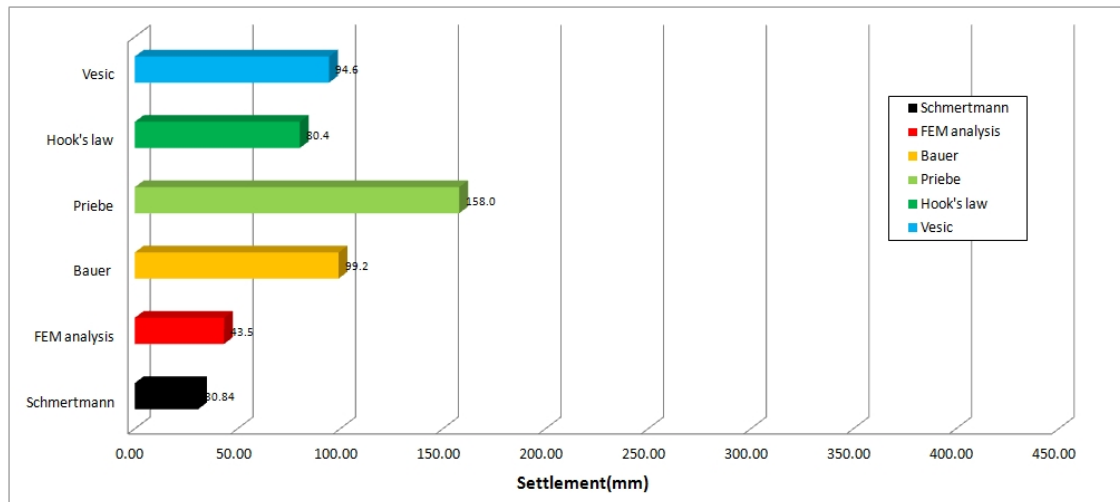


Fig. 6. Settlement results for B=H=15 m, H<B

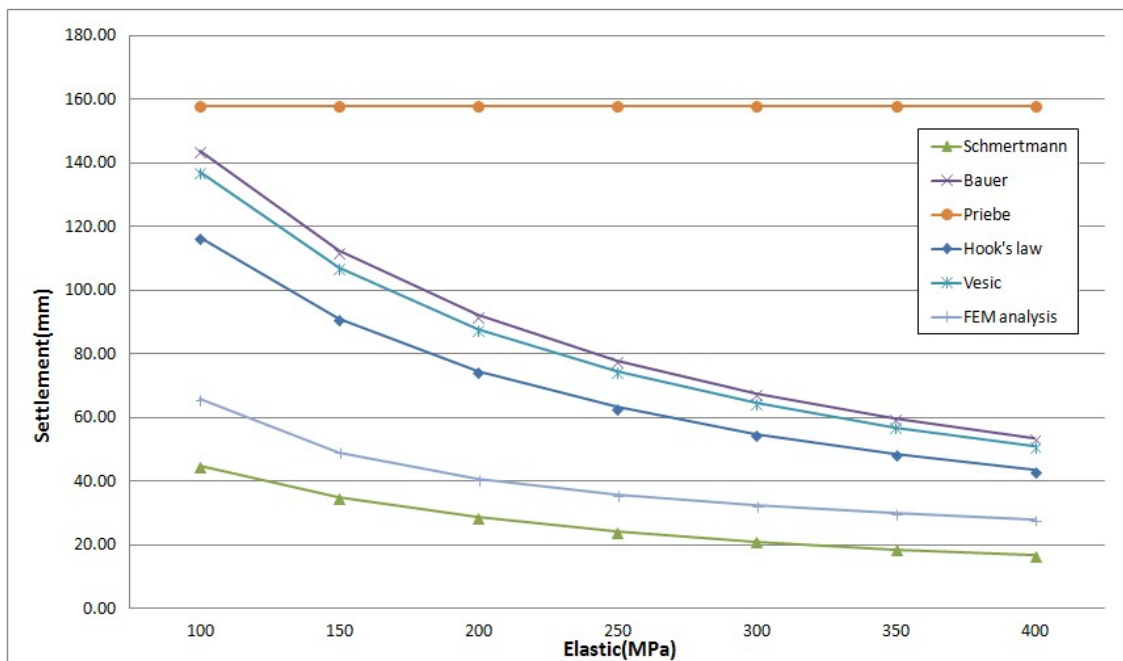


Fig. 7. Settlement according to the modulus of elasticity ( $E_s$ ) of the stone column

### 3.4 탄성계수( $E$ )에 따른 영향

Priebe 식을 제외한 모든 제안식의 경우 복합지반의 탄성계수( $E_m$ )가 가장 큰 영향을 미친다. 하지만 국가나 기업 또는 제안자에 따라 사용하는 쇄석의 탄성계수( $E_s$ )는 각각 다르며, 그 범위 또한 커서 실제 지반 거동과 일치하는 탄성계수를 결정하는 것은 매우 어려운 문제이다. Table 3은 기업이나 제안자, 연구에 의해 제시된 쇄석의 탄성계수( $E_s$ )를 정리한 것이다.

Table 3과 같이 제안된 쇄석의 탄성계수( $E_s$ )는 28.7~600 MPa로 그 범위가 상당히 크게 나타나고 있다. 쇄석말뚝 장비의 제조사이면서 쇄석말뚝의 설계 및 시공 경험이 많은 Bauer사의 경우 경험적으로 100~200MPa의 범위를 주로

Table 3. Modulus of elastic of the stone column

| References   | $E_s$ (MPa) |
|--|-------------|
| Geopier  | 145 ~ 195   |
| Roy E. Hunt  | 100 ~ 120   |
| Iowa state university (2003)   | 28.7 ~ 57.5 |
| The design of vibro replacement (Keller)   | 100         |
| Jazan refinert and terminal project epc#2  | 100         |
| Emal phase 2 ccpp design of stone column (Bauer)                                     | 180         |
| Typical values of young's elastic modulus and poisson's ratio for pavement materials | 150 ~ 600   |

사용하는 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 쇄석의 탄성계수( $E_s$ ) 범위를 100~400MPa로 가정하여 50MPa씩 증가시켜 가면서 침하량을 산

정하였으며, 쇄석의 탄성계수( $E_s$ )의 영향이 없는 Priebe 식 결과와 상호 비교를 실시하였다. 그 결과는 Fig. 7과 같으며 탄성계수( $E_s$ )의 영향을 받지 않는 것으로 알려진 Priebe 식을 제외하고 볼 때 Bauer 식이 가장 큰 침하량을, Schmertmann 식이 가장 작은 값으로 침하량을 예측하였다. 또한 탄성계수( $E_s$ )가 증가할수록 침하량은 감소하였으며, 탄성계수( $E_s$ )가 300MPa 이상으로 커지면 침하량 감소율이 탄성계수( $E_s$ )가 작은 경우에 대비해 상대적으로 감소하였다. 또한 침하량을 상대적으로 크게 예측하는 Bauer, Vesic, Hook's law 식에서 탄성계수( $E_s$ ) 증가에 따른 침하량 감소율(기울기)이 유사하며 그 감소 정도도 주어진 조건 내에서 약 80~90mm 정도로 크게 나타났다. 그러나 가장 작은 값을 예측하는 Schmertmann 식은 다른 예측식들과 달리 탄성계수( $E_s$ ) 증가에 따른 침하량 감소 정도가 약 20mm 정도로 적게 나타났다. Vesic과 Bauer 식은 본 연구에서 적용한 탄성계수 전 구간에서 유사한 결과가 산정되었다.

유한요소해석(FEM) 결과와 비교 시 Schmertmann 식을 제외한 대부분의 식들이 최소 20mm 이상 큰 값을 예측하며, Schmertmann 식 또한 전 구간에서 약 10mm 정도 작게 예측하고 있어 다소 편차가 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 유한요소해석 결과를 기준으로 볼 때, 본 연구에서 비교한 식 중 Schmertmann 식을 제외한 대부분의 식들이 침하량을 보수적으로 평가하고 있으나 그 편차가 커서 침하 예측 시 적용할 식에 대한 적절한 선정 및 다양한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 침하량 산정 이론식 비교 및 분석

쇄석말뚝 침하량 산정 시 가장 크게 영향을 미치는 주요 설계 Parameter에 대한 분석 결과를 이용하여 각각의 쇄석

말뚝 침하량 산정 이론식 및 유한요소해석에 대한 비교·분석을 실시하였다.

#### 4.1 분석조건

각각의 이론식에 대한 비교·분석을 실시하기 위하여 검토 단면을 Fig. 8과 같이 설정하였으며, 지반 정수는 Table 4와 같이 가정하여 적용하였다. 폭(B)은 70m, 하중은 300kN/m<sup>2</sup>, 쇄석말뚝 길이(H<sub>s</sub>)는 15m, 말뚝 직경(d)은 1.0m, 간격(s)은 2.2m(치환율 16.2%)로 가정하여 적용하였으며 하부 25m 이후의 침하량은 없는 것으로 가정하였다.

기초 저면 밑의 지반이 파괴되는 경우 활동면에 미치는 범위는 대개 기초 저면에서 그 폭의 2배 정도 깊이까지이다. 기초 폭이 2배의 깊이까지 지반이 일정할 때는 문제가 없으나, 다른 층이 존재하는 경우에는 다른 침하거동이 발생하게 된다. 이러한 경우 영향계수 표로부터 지중응력을 산정하거나 30°, 45°, 2:1 분포의 간편법을 사용하여 지중응력을 산정한다.

2개 이상의 다층인 경우 Priebe, Bauer, Schmertmann의 제안식은 각각의 지층에 따라 침하량 계산이 가능하나 Vesic 식과 Hook's law 식의 경우 별도의 고려가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 2:1 분포법을 이용하여 Vesic 식과 Hook's law 식의 침하량을 산정하였다. 또한 3장과 마찬가지로 이론식으로부터 산정된 결과를 비교하기 위해 유

Table 4. Geotechnical parameters for comparative study of settlement

|          | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\phi$ (°) | $c_u$ (kPa) | $E_c$ (MPa) | $\nu$ |
|----------|-------------------------------|------------|-------------|-------------|-------|
| Ground 1 | 17.0                          | 25         | 5.0         | 15          | 0.35  |
| Ground 2 | 19.0                          | 30         | 10.0        | 35          | 0.33  |
| Stone    | 18.0                          | 40         | -           | 200         | 0.35  |

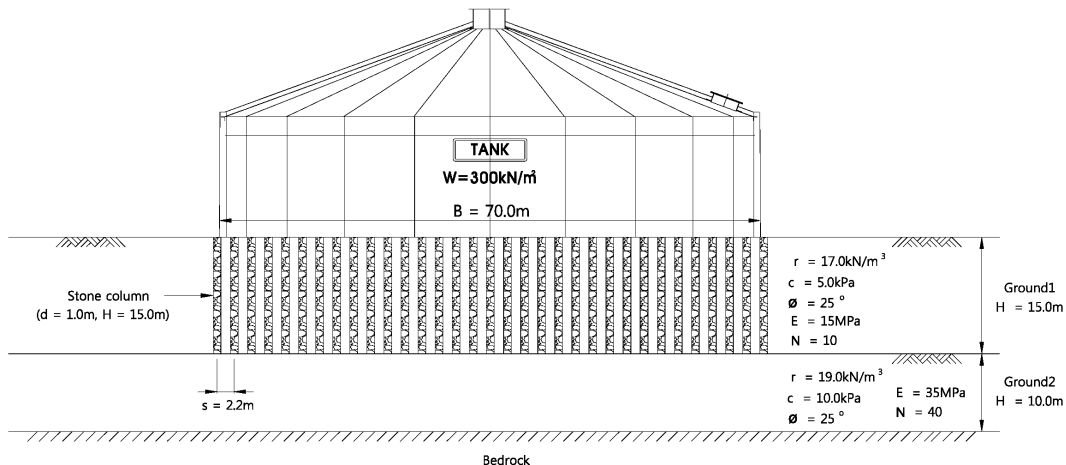


Fig. 8. Schematic model for comparative study of settlement

한요소해석을 수행하였으며, 그 절차는 3.2절에서 언급한 바와 같다.

#### 4.2 침하량 산정 결과

각각의 이론식에 따른 침하량 산정 결과 개량 전 침하량은 Fig. 10과 같이 최소 129.2mm에서 최대 359mm로 산정되었으며, 3장의 결과와 같이 Schmertmann 식이 가장 작게 산정되었다. An(2012)의 연구에 의하면 Schmertmann 식은 부등침하를 평가할 수 없음을 따라 비교적 폭이 적은 기초(독립 기초, 띠 기초 등)에 적용하는 것이 타당하며 폭이 큰 Mat 기초, Tank 기초는 탄성론에 의한 침하공식을 적용하는 것을 제안하였다.

개량 후 침하량 산정 결과는 Fig. 11과 같으며, 최소 72mm에서 최대 244mm로 산정되었다. 개량 전과 비교해보면 Bauer 식의 경우 개량 후 침하량이 개량 전에 비해 45% 정도로 감소율이 가장 크며, 이에 비해 Priebe 식은 감소율이 가장 작

게 나타났다. Priebe 식은 다른 이론식과는 달리 개량 전 침하량에 침하개량계수를 나누어 구하며 침하개량계수는 개량률, 쇄석의 내부마찰각, 포아슨비에 따른 영향을 받는다. Kim et al.(2011)은 현장재하시험을 실시하여 Priebe 식과 비교한 결과 Priebe 식의 침하량이 예측된 침하량에 비해 4~8배 크게 나타나며, 상당히 과다 평가된다고 보고되었다. 또한 Raman(2006)이 말레이시아 지역의 Trans-Asia Railway에 스톤 컬럼이 시공된 현장에서 침하량을 현장 계측하여 Priebe 식으로 설계한 침하량과 비교한 결과 현장 계측값이 Priebe 식으로 예상한 침하량보다 매우 작았고, 그 오차가 평균 42.3%라 보고하였다. 다른 식의 경우 개량 전 대비 개량 후 침하량이 약 38~56% 정도로 산정되었다. 그리고 Vesic과 Bauer 식이 3장에서와같이 유사한 결과를 보이고 있으며, 수치해석(MIDAS GTS)과 비교해 보면 Hook's law 식이 가장 유사한 침하량을 산정하는 것으로 나타났다.

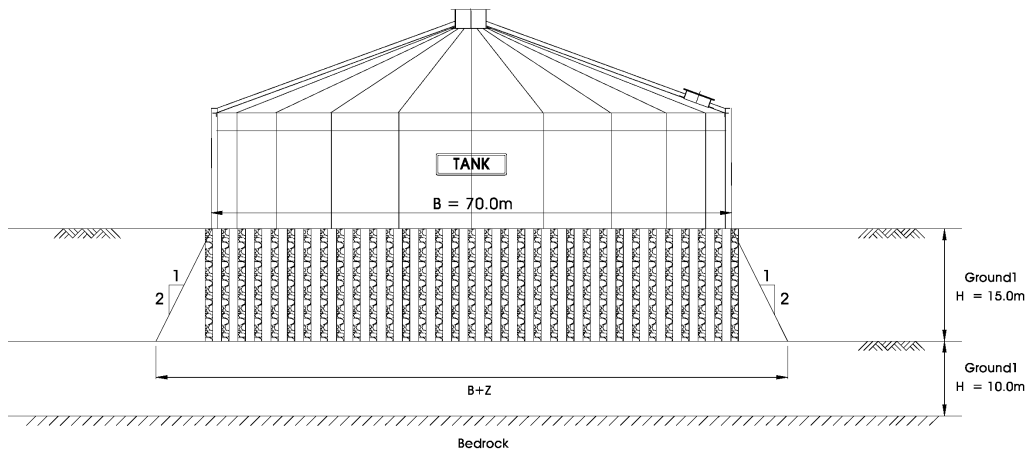


Fig. 9. 2:1 Distribution method

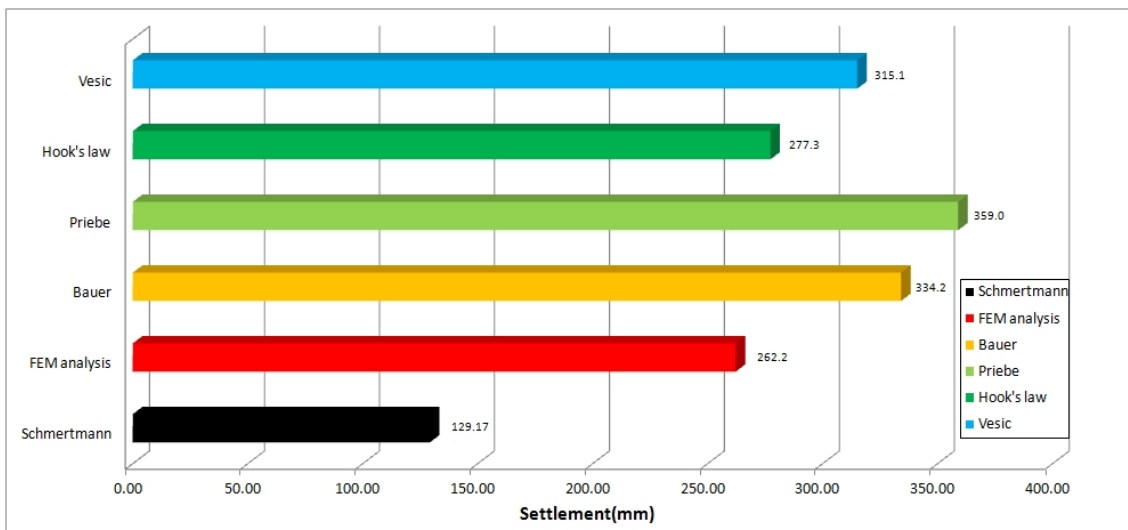


Fig. 10. Calculation results of settlement before improvement

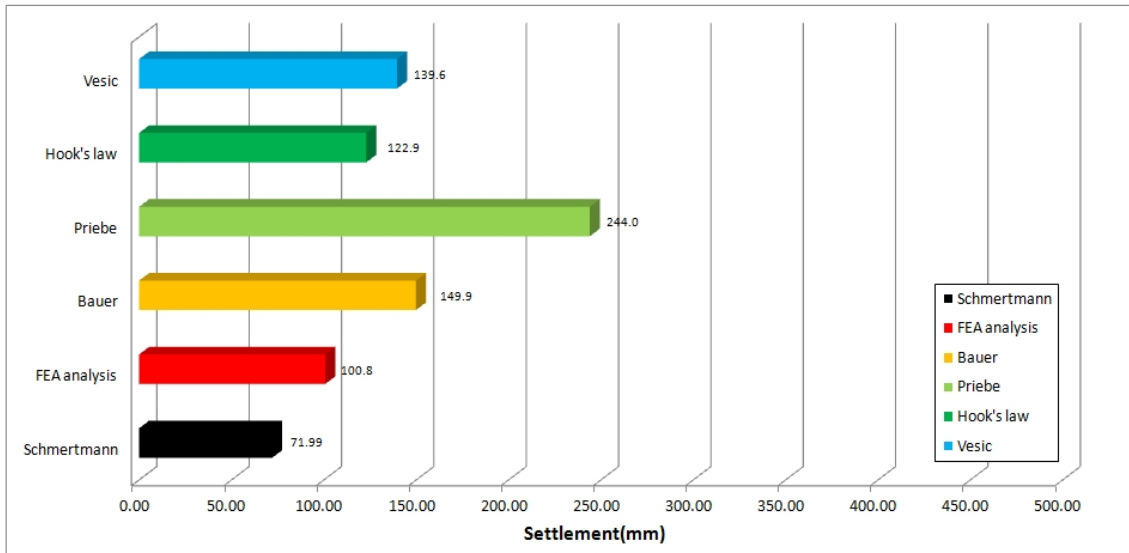


Fig. 11. Calculation results of settlement after improvement

## 5. 결 론

본 논문은 쇄석말뚝의 탄성 침하량 예측방법에 대하여 분석하였다. 침하량 비교에 사용된 산정이론은 Schmertmann 제안식, Priebe 제안식에 추가로 장비제조사인 Bauer사의 침하량 제안식, Vesic의 제안식, Hook's law의 탄성이론, 수치해석을 이용하여 상호 비교·분석 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 이론식에 따른 침하량 산정 시 주요 설계 Parameter는 Vesic 식과 Hook's law의 탄성이론의 경우 기초 폭(B)이 가장 큰 영향을 미치며, Priebe 식을 제외한 모든 제안식의 경우 복합지반의 탄성계수( $E_m$ )가 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (2) 주요 설계 Parameter 검토 결과 Vesic 식과 Hook's law의 탄성이론 기초 폭(B)은  $B > H$ 인 경우 침하 가능성이 있는 지반의 깊이(H)로 변경하여 침하량을 산정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.
- (3) 탄성계수( $E_s$ )의 경우 쇄석말뚝의 설계 및 시공 경험이 많은 Bauer사의 경우 경험적으로 100~200MPa의 범위를 주로 사용하고 있으며, 탄성계수( $E_s$ )가 증가할수록 침하량은 감소하고 탄성계수( $E_s$ )가 300MPa 이상으로 커지면 침하량 감소율이 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 주요설계 Parameter에 대한 분석 결과를 적용하여 각각의 쇄석말뚝 침하량 산정 이론식과 수치해석 결과를 비교·분석한 결과 Hook's law 식이 수치해석과 가장 근접

한 것으로 확인되었다.

- (5) 실용적인 이유로 제안된 가정이나 단순화시킨 이론식을 이용하여 사전에 지반의 침하 예측을 정확히 계산하는 것은 상당히 어려운 문제이다. 따라서 시공을 통해 실제 발생하는 침하량을 측정하여 설계 타당성을 확인하면서 많은 경험과 실측치를 통하여 설계자료 축적을 통한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

## References

1. An, J. H. (2012), Study on improving methods for estimates of settlement based on tank in Middle East, Master's thesis, yonsei university, pp. 42~44 (in Korean).
2. Iowa state university (2003), Highway applications for rammed aggregate piels in Iowa soils, Iowa state university, pp. 9.
3. Kim, S. W., Lee, C. H., Kim, K. H. and Choi, H. S. (2011), A comparison of analysis methods on mechanical behavior of stone column reinforced in the soft sabkha deposit, Korean Geotechnical Society, pp. 53~63 (in Korean).
4. Korean Geotechnical Society (2009), Commentary of foundation structure design criteria, Korean Geotechnical Society, pp. 247~266 (in Korean).
5. Priebe (1976), Estimating settlements in a gravel column consolidated soil, Die bautechnik 53, German, pp. 160~162.
6. Raman, S. (2006), Comparison of predicted settlement behavior to the field measurement of stone column improved ground, M.S. Theis, Universiti Teknologi Malaysia, pp. 33~63.
7. Vesic, A. S. (1961), Bending of beams resting on isotropic elastic soil, ASCE Journal of the Engineering Mechanics, Vol. 87, No. EM2, pp. 35~53.