

## DCM 배치 형상에 따른 연약지반 거동 특성에 관한 연구

### A Study on Behavior Characteristics of Soft Ground by DCM Arrangement Type

유승경<sup>1</sup>, 이종영<sup>2</sup>, 홍기권<sup>3\*</sup>

Seung-Kyong You<sup>1</sup>, Jong-Young Lee<sup>2</sup>, Gigwon Hong<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, 134 Gajwa-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03656, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Research Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang Univ., 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Assistant Professor, Dept. of Civil and Disaster Prevention Engineering, Halla University, 28 Halladae-gil, Wonju-si, Gangwon-do 26404, Republic of Korea

#### ABSTRACT

This study described the relationship of settlement-lateral displacement and settlement-heaving according to the DCM type using the model test results, in order to evaluate the behavioral characteristics of the soft ground improved with DCM. As a result, it was found that the total settlement of the model ground was relatively small in the soft ground, to which the DCM was applied, and the settlement was less in the order of the grid type, wall type, and pile type under the same load conditions. This trend was also the same for the lateral displacement and heaving. In addition, the relationship between settlement and lateral displacement of soft ground was analyzed to be similar to that of previous study (Leroueil et al., 1990). Therefore, the DCM of grid type was evaluated to be superior to other types for lateral flow and heaving in the improvement effect of soft ground.

#### 요 지

본 연구에서는 DCM으로 보강된 연약지반의 거동특성을 평가하기 위하여, 모형실험결과를 이용하여 DCM 배치 형상에 따른 침하-측방변위, 침하-융기 관계를 분석하였다. 그 결과, 모형지반의 지표면 누적 침하 거동은 DCM이 적용된 지반에서 상대적으로 침하가 적게 발생하였고, 격자식, 벽식, 말뚝식의 순으로 동일한 하중조건에서 침하량이 적게 발생한 것을 알 수 있었다. 이와 같은 경향은 측방변위량과 융기량에 대해서도 동일하게 나타난 것을 확인하였다. 연약지반의 침하와 측방유동의 관계를 분석한 결과, 기존 연구(Leroueil et al., 1990)와 유사한 거동을 보이는 것으로 확인되었다. DCM 배치 형상에 따른 지반개량효과를 평가한 결과, 측방유동과 지반 융기에 대하여 격자식 보강이 벽식 및 말뚝식 보강에 비해 탁월한 지반개량효과를 보유했던 것으로 평가되었다.

**Keywords** : Deep cement mixing (DCM), Soft ground, Settlement, Lateral displacement, Heaving

#### 1. 서 론

연약지반은 전단강도가 매우 작아 상부 구조물의 하중에 의해 매우 큰 침하와 함께, 지반파괴가 발생하게 된다.

특히 연약지반 상에 대형 구조물을 시공하기 위해서는 지반의 강도 및 지지력 문제를 해결할 수 있도록 다양한 방법에 의해 개량되어지고 있다. 연약지반 개량공법 중, 국내에서 주로 적용하는 공법은 모래다짐말뚝공법, 쇄석말뚝공법 및 치환공법 등이 있다(Yoo et al., 2012). 그러나 앞서 언급한 공법들은 연약지반의 심도에 따라 강도개선에 한계성을 가지고 있을 뿐만 아니라, 천연재료의 감소에

Received 12 Dec. 2021, Revised 15 Dec. 2021, Accepted 17 Dec. 2021

\*Corresponding author

Tel: +82-33-760-1843; Fax: +82-33-760-1261

E-mail address: g.hong@halla.ac.kr (G. Hong)

다른 단가가 지속적으로 상승하고 있기 때문에, 최근 연약 지반의 두께가 큰 경우에는 시멘트를 이용하여 연약지반 내에 연속벽 및 블록벽과 같은 다양한 형태의 개량체 형성이 가능한 DCM의 적용이 증가하고 있는 추세이다(Lee et al., 2007; Kim et al., 2011; Yoo et al., 2012; Shin et al., 2014).

DCM은 시멘트와 물로 혼합된 재료를 연약지반 내에 주입하면서 교반 및 혼합하고, 시멘트의 경화반응을 바탕으로 연약지반을 개량하는 공법이다(Kim et al., 2011). 이와 같은 DCM의 중요한 평가 요소는 연약지반에서 형성된 개량체의 보강효과라 할 수 있으며, 이를 평가하기 위한 수단으로 개량체 강도특성과 개량체가 시공된 지반의 변형을 확인하는 방법 등이 있다. 이와 관련한 다양한 기존연구를 살펴보면, Kim and Park(2018)은 중력식 항만 구조물 하부지반의 보강을 위하여, DCM으로 개량된 지반의 파괴확률과 위험도 평가를 분석한 바 있다. Lee and Jung(2012)은 개량체 기둥이 상부 성토체의 침하량 및 측방변위 감소에 미치는 효과를 수치해석적으로 평가하였으며, Shin(2008)은 말뚝식 개량체의 배치형태가 지반거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수치해석 및 모형토조 실험 결과를 이용하여 복합지반 및 주변 지반의 거동을 분석하였다. Park and Song(2020)은 DCM 설계 시 적합한 개량형식을 제시하기 위하여, 지반개량형식인 복합식 지반과 말뚝식 지반에 대해 유한요소해석을 실시한 바 있으며, Hong(2020)은 연약지반에 설치된 DCM의 개량효과를 개량형식에 따라 비교하기 위하여 실내모형실험결과를

이용하여 지반의 침하량 및 측방변위량을 분석한 바 있다. Lee et al.(1994)는 성토제방 시공에 따른 연약지반의 안정화를 위하여 시멘트 개량말뚝으로 보강된 지반의 거동효과에 관한 실험적 연구를 수행하였고, You and Hong(2020)은 개량 형식에 따른 연약점토지반의 용기 특성을 실험적으로 평가하였다.

그러나 이러한 다수의 연구 성과들이 축적되어 있음에도 불구하고 최근의 다양한 배치 형상으로 시공되고 있는 DCM 개량지반의 거동을 엄밀히 예측하기에는 다소 부족함이 있으며, 이를 해결하기 위해서는 DCM의 배치 형상에 따른 지반 변형 특성의 상호관계를 규명할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 연구(Hong, 2020)에서 수행된 실내모형실험 결과를 바탕으로, 세 가지 배치 형상의 DCM으로 보강된 연약지반에 대하여 상재하중 크기에 따른 침하거동, 측방유동 및 용기량을 비교·분석하였다. 이를 바탕으로 보강 지반의 침하-측방변위, 침하-용기 관계를 분석함으로써 DCM 배치 형상에 따른 지반개량효과를 평가하였다.

## 2. DCM 배치 형상을 모사한 실내모형실험

### 2.1 DCM 배치 형상 및 지반의 공학적 특성

세 가지 배치 형상의 DCM으로 보강된 연약지반의 거동을 평가하기 위한 실내모형실험이 수행되었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, DCM 형상은 말뚝식, 벽식 및 격자식

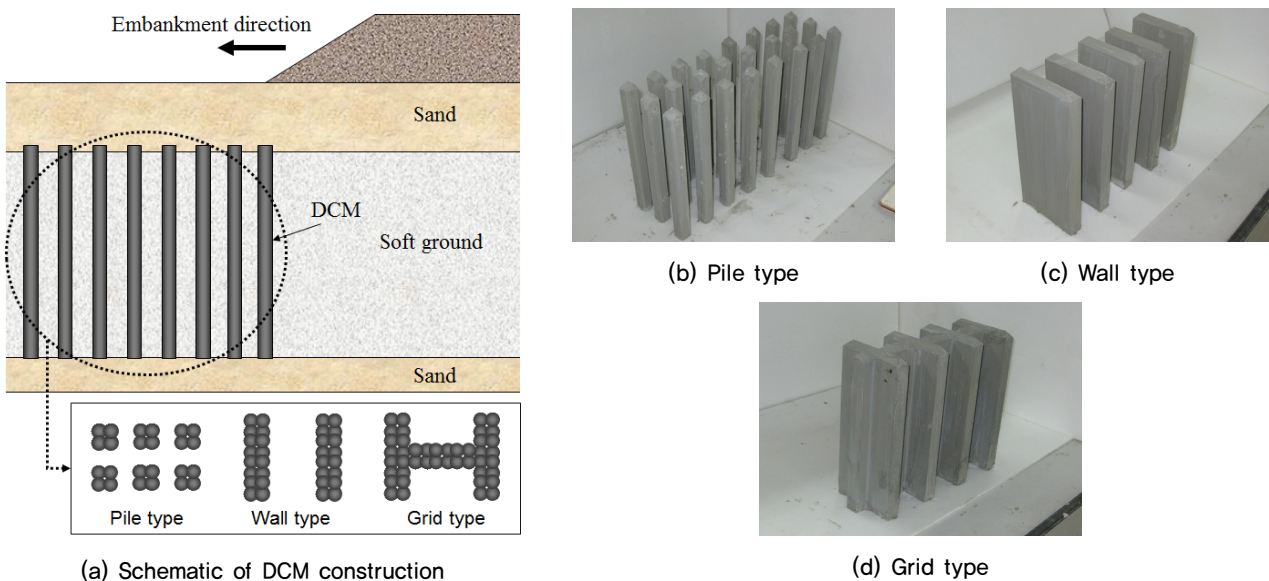
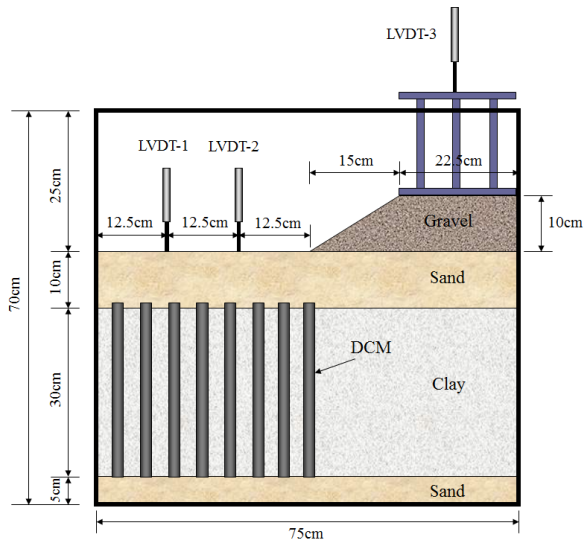
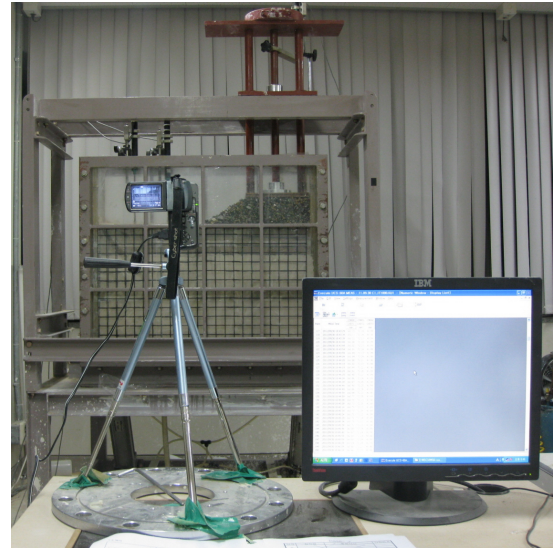


Fig. 1. DCM arrangement type in soft ground (Hong, 2020; You and Hong, 2020)



(a) Schematic



(b) Equipment set-up

Fig. 2. Equipment for model test (Hong, 2020)

Table 1. Test cases (Hong, 2020)

Cement column type	Loading stage	Pressure increment (kPa)	Total surcharge (kPa)
Non improvement	1	9.03	9.03
	2	2.96	11.99
	3		14.96
	4		17.92
	5		20.88
	6		23.84
Pile	1	9.03	9.03
	2	2.96	11.99
	3		14.96
	4		17.92
	5		20.88
	6		23.84
	7		26.81
Wall	1	9.03	9.03
	2	2.96	11.99
	3		14.96
	4		17.92
	5		20.88
	6		23.84
	7		26.81
Grid	1	9.03	9.03
	2	2.96	11.99
	3		14.96
	4		17.92
	5		20.88
	6		23.84
	7		26.81
	8		29.77
	9		32.73
	10		35.70

으로 적용되었으며, 연약지반 상에서 DCM의 적용 범위는 개량체로 인한 연약지반의 측방유동 억제가 고려될 수 있도록 하였다. 즉, 성토체 하부에는 개량체를 적용하지 않고, 성토체 경사면 선단부터 성토 진행 방향으로만 개량체 시공을 모사하였다. DCM 모형의 제작 및 연약지반 모사를 위해 사용된 흙(모래, 점토)의 물리적 특성은 기존 연구(Hong, 2020)에 상세하게 나타나 있다.

## 2.2 모형실험

Fig. 2는 모형실험 개요도와 실험장치를 나타낸 것으로서, 실험과정과 실험내용은 기존 연구(Hong, 2020)를 참조할 수 있으며, 실험방법을 요약하면 다음과 같다.

연약지반의 변형을 실시간으로 관측할 수 있도록 전면 에 투명 메쉬가 적용된 토조(폭 0.15m, 가로 0.75m, 높이 0.7m)에 연약지반 모사 및 DCM을 설치하였다. 그리고 토조의 모든 내부 벽면에는 오일과 비닐 랩을 이용한 마찰저감처리(lubrication)를 하여 흙의 마찰을 최소화하였다.

DCM 배치 형상에 따른 연약지반의 거동을 모사하기 위한 모형실험은 DCM을 적용하지 않은 무보강 연약지반과 함께, 말뚝식, 벽식 및 격자식의 개량체가 적용된 경우에 대하여 단계하중을 적용하여 하중조건에 따른 지반변형을 관측(침하, 용기, 측방변위)하였고, 실험조건은 Table 1과 같다.

## 3. 분석 및 고찰

본 연구에서는 세 가지 배치 형상의 DCM으로 보강된

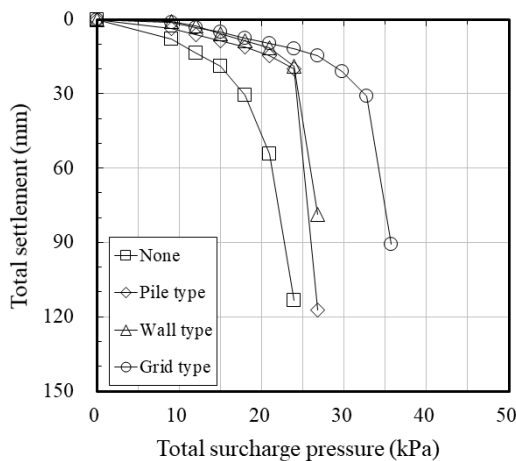


Fig. 3. Relationship of surcharge and total settlement

연약지반에 대하여 상재하중 크기에 따른 지반의 침하-측방변위, 침하-용기 관계를 분석하였으며, 이때 침하량, 측방변위량 및 용기량은 기존 연구(Hong, 2020)를 참조하였다.

### 3.1 상재하중 증가에 따른 보강 지반의 변형 특성

먼저, Fig. 3은 본 연구에서 수행한 모형실험에서 상재하중 증가에 따른 모형지반의 재하부 지표면 누적 침하 거동을 나타낸 것이다. 무보강의 경우 작은 하중 증가에도 침하가 급격히 발생하였으며 DCM으로 보강된 경우에는 상대적으로 침하가 적게 발생되었음을 알 수 있었다. 또한 DCM 보강의 경우에도 배치 형상에 따라서 침하거동의 차이가 발생하였는데, 격자식, 벽식, 말뚝식의 순으로 동일한 하중에 대한 침하량의 발생이 적은 것을 알 수 있었다.

한편 하중과 침하량의 관계로부터 산정할 수 있는 지반의 극한상태는 무보강의 경우 전형적인 비선형 관계에서 접선법을 이용하여 추정할 수 있는 반면 DCM으로 보강된 경우는 모두 급격한 침하 양상을 보이는 시점에서 쉽게 예측이 가능한 특징을 보였다.

상재하중 증가에 따른 모형지반의 재하부 끝단 직하부에서의 최대 측방변위를 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 상재하중 증가에 따른 침하 거동과 마찬가지로 무보강의 경우에는 작은 하중 증가에도 불구하고 측방변위가 크게 발생되었지만, 보강된 경우에는 상대적으로 적은 측방변형이 발생되었음을 알 수 있었다. 그리고 DCM 배치 형상에 따라서 측방변형의 차이가 발생하였는데, 동일한 하중조건에 대하여 격자식, 벽식, 말뚝식의 순으로 발생된

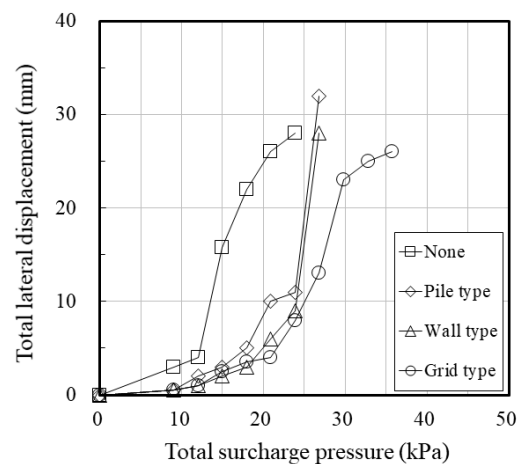


Fig. 4. Relationship of surcharge and total lateral displacement

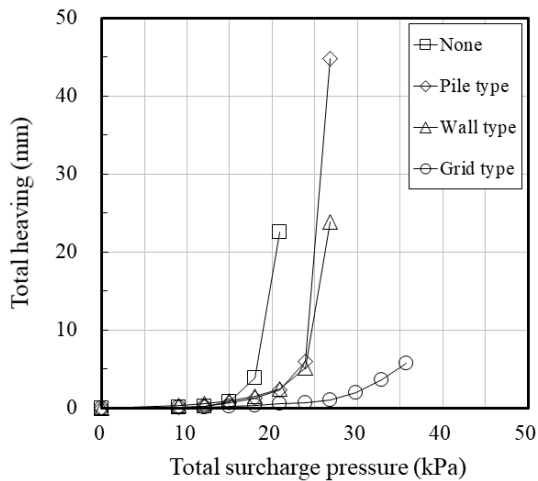


Fig. 5. Relationship of surcharge and total heaving

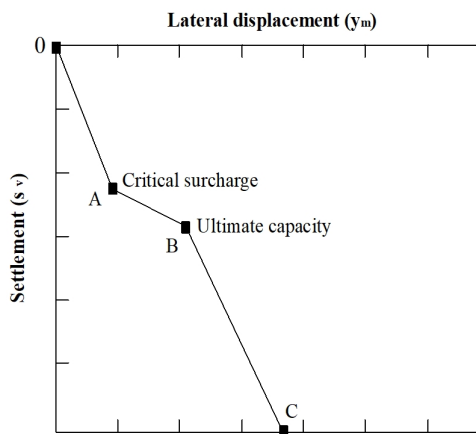


Fig. 6. Relationship of settlement and lateral displacement on soft ground (Leroueil et al., 1990)

측방변위량의 크기가 작게 나타난 것을 확인하였다.

마지막으로 상재하중 증가에 따른 모형지반 미성토 구간에서의 최대 지반 용기량의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 상재하중 증가에 따른 침하 및 측방유동 거동과 마찬가지로 무보강의 경우에는 작은 하중 증가에도 불구하고 지반용기가 크게 발생되었지만, DCM으로 보강된 경우에는 상대적으로 용기량이 적게 발생 되었다. 그리고 DCM 배치 형상에 따라서 지반 용기량의 차이도 발생하였는데, 이는 앞선 침하 및 측방유동 분석 결과와 동일한 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 DCM으로 보강된 연약지반의 침하와 측방변위 관계

Fig. 7은 본 연구에서 수행한 모형실험의 누적 침하량과

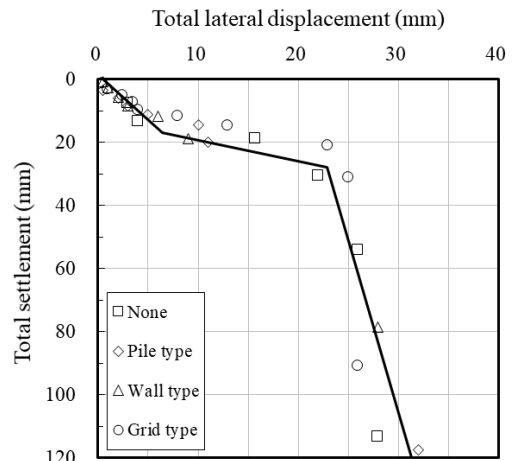


Fig. 7. Relationship of total settlement and total lateral displacement by tests

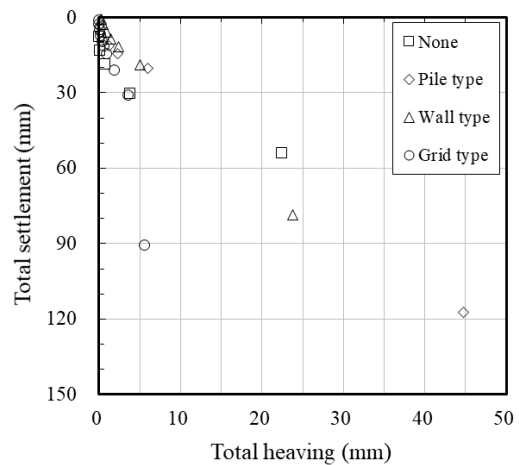


Fig. 8. Relationship of total settlement and total heaving by tests

성토체 경사면 선단 직하부에서의 최대 측방변위량의 관계를 나타낸 것이다. DCM 보강의 유무와 배치 형상에 관계없이 모형지반의 침하와 측방유동 관계는 Fig. 6에 나타낸 Leroueil et al.(1990)이 제시한 연약지반의 변형거동 과정을 잘 나타내고 있다. 즉, 재하시점에서 한계하중까지의 1단계 변형 거동과 그 이후부터 극한하중까지의 2단계 변형거동, 마지막으로 배수거동이 시작되는 극한하중 이후의 3단계 거동의 순서로 본 모형지반이 거동하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8은 모형지반의 누적 침하량과 미성토 구간의 최대 지반 용기량의 관계를 나타낸 것이다. 일부 실험조건을 제외하면 지반 용기는 DCM의 배치 형상과 관계없이 침하량이 연약지반 두께의 약 10% 수준인 30mm 이내에서 대부분 발생하는 것으로 평가되었다.

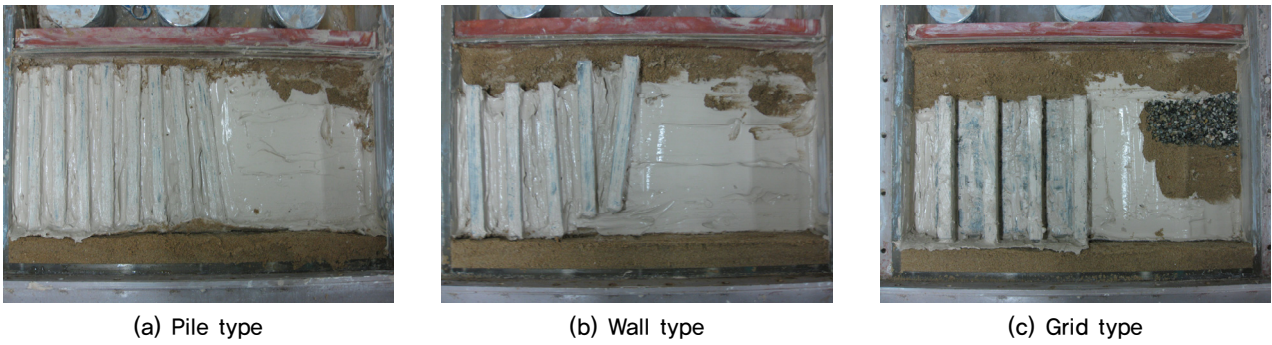


Fig. 9. Behavior of cement column

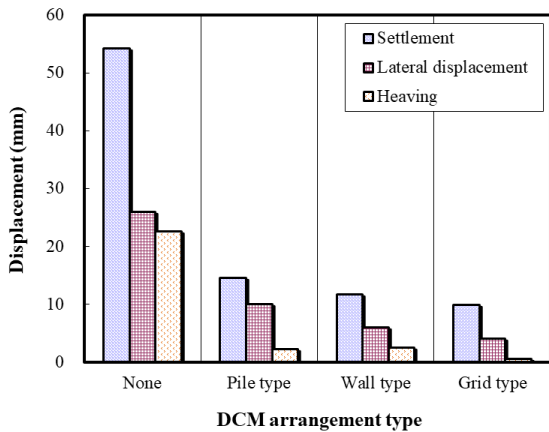


Fig. 10. Comparison of soft ground displacement by cement column type

### 3.3 DCM 배치 형상에 따른 거동 형상 및 지반개량 효과 평가

Fig. 9는 모형지반에 대한 재하실험을 종료한 후, DCM 배치 형상에 따른 개량체의 최종 거동 형상을 나타낸 것이다. 먼저, 말뚝식의 경우 미개량층의 DCM 개량체 상단부 이동이 하단부보다 크게 발생되어 전도의 형상을 나타내었는데, 이는 말뚝식 개량체에 측방유동압이 작용함과 동시에 개량체와 개량체 사이로 점토가 유동하면서 발생하는 거동으로 판단되었다. 반면 벽식의 경우는 미개량층의 개량체가 상향 이동된 것을 확인할 수 있는데, 이는 말뚝식과 비교해볼 때 점토의 측방유동에 의한 흐름이 원천적으로 억지되어 벽식의 개량체가 측방유동압에 의해 점토와 함께 융기된 것으로 판단되었다. 마지막으로 격자식의 경우에는 벽식과 유사한 측방유동 억지 메커니즘을 갖고 있음에도 불구하고 설치 초기의 형상대로 밀리는 것을 확인할 수 있었다. 이는 격자식 구조의 DCM 개량형태가 측방유동압에 대하여 상대적으로 매우 안정적이고 큰 억지 효과를 발휘하고 있는 것을 의미하는 결과로 판단되었다.

Fig. 10은 모형실험에서 측정한 DCM 배치 형상에 따른 지반 변위량을 비교한 것으로서, 각각의 변위량은 상재하중이 20.9kPa인 경우에 대한 값을 나타낸 것이다. 무보강의 경우에 비해서 DCM으로 보강된 지반 변위량은 상대적으로 매우 적게 나타나고 있으며 배치 형상에 따라서도 지반 변위량의 차이가 확연한 것을 알 수 있는데, 격자식, 벽식, 말뚝식의 순으로 지반 변위량의 발생이 적게 나타났다. 특히, 배치 형상 중 격자식 보강의 경우는 측방유동과 지반 융기에 대하여 다른 형식에 비해 탁월한 지반개량효과를 나타내고 있는 것으로 평가되었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 다양한 배치 형상을 갖는 DCM으로 보강된 연약지반에 대하여 침하-측방변위, 침하-융기 관계와 함께, DCM 배치 형상에 따른 지반개량효과를 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 상재하중 증가에 따른 모형지반의 재하부 지표면 누적 침하 거동을 분석한 결과, 무보강의 경우 작은 하중 증가에도 침하가 급격히 발생한 반면에, DCM으로 보강된 경우에는 상대적으로 침하가 적게 발생하였고, 이는 격자식, 벽식, 말뚝식의 순으로 동일한 하중조건에서 침하량이 적게 발생한 것을 알 수 있었다. 이와 같은 경향은 측방변위량과 융기량에 대해서도 동일하게 나타난 것을 확인하였다.
- (2) 연약지반의 침하와 측방유동의 관계를 분석한 결과, 재하시점에서 한계하중까지의 변형 거동과 그 이후부터 극한하중까지의 변형거동, 배수거동이 시작되는 극한하중 이후의 거동은 기존 연구(Leroueil et al., 1990)와 유사한 것으로 확인되었다.

- (3) 연약지반의 침하, 측방유동 및 용기에 대한 변위량은 DCM 배치 형상에 따라 격자식, 벽식, 말뚝식의 순으로 적게 발생하였으며, 격자식 보강이 측방유동과 지반 용기에 있어서 다른 배치 형상에 비해 탁월한 지반 개량효과를 나타내는 것으로 평가되었다.

## References

- Hong, G. (2020), "Experimental Study on Soft Ground with DCM Column", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.19, No.3, pp.35-44.
- Kim, B. I. and Park, E. S. (2018), "The Case Study on Risk Assessment and Probability of Failure for Port Structure Reinforced by DCM Method", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.17, No.4, pp.53-64.
- Kim, B. I., Yoo, W. K., Lee, S. H. and Han, J. T. (2011), "Stability Analysis of DCM treated Ground Using Centrifuge Test", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.11, No.3, pp.105-110.
- Lee, C. K., Shin, B. W., Heo, Y. and Ahn, S. R. (1994), "A Study on the Behavior of Soft Clay Foundation Reinforced with Soil - Cement Piles by Centrifugal Model Tests", *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.10, No.2, pp.109-120.
- Lee, K. Y., Yoon, S. T., Kim, S. M. and Han, W. S. (2007), "Strength of Improved Soil on the Work-conditions of Deep Mixing Method", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.23, No.7, pp.99-104.
- Lee, M. G. and Jung, D. H. (2012), "Finite Element Analysis on the Bending Behavior of DCM Columns Supporting Embankment", *Korean Society of Civil Engineers*, Vol.2012, No.10, pp.1180-1183.
- Leroueil, S., Magnan J. P. and Tavenas, F. (1990), "Embankments on soft clays", Ellis Horwood.
- Park, C. S. and Song, J. W. (2020), "An Analytical Study on the Determination of the Lowest Improvement Depth of Deep Mixing Method", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.19, No.1, pp.35-44.
- Shin, H. Y., Kim, B. I., Kim, K. O. and Han, S. J. (2014), "A Comparative Study of Structural Analysis on DCM Improved by Pile and Block Type", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.30, No.4, pp.5-19.
- Shin, I. S. (2008), An Analysis on the Behaviour Characteristics of the Soil Foundation with the Arrangement Type of Deep Cement Mixing, M.D. Thesis, Chonnam National University.
- Yoo, W. K., Kim, B. I. and Kim, Y. U. (2012), "Case Study of Stress Concentration Ratio of Composite Ground Improved by Deep Cement Mixing Method", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.13, No.7, pp. 3216-3223.
- You, S. K. and Hong, G. (2020), "A Study on Ground Heave Characteristics of Soft Ground with DCM", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.19, No.4, pp.75-84.