

심층혼합처리공법으로 개량된 복합지반의 응력분담비에 대한 사례 연구

유완규¹, 김병일^{1*}, 김영욱¹
¹명지대학교 토목환경공학과

Case Study of Stress Concentration Ratio of Composite Ground Improved by Deep Cement Mixing Method

Wan-Kyu Yoo¹, Byoung-Il Kim^{1*} and Young-Uk Kim¹

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University

요 약 심층혼합처리(deep cement mixing, DCM)공법은 두꺼운 연약지반을 개량하는 공법 중 하나이다. 이 공법은 저소음, 저진동으로 공해가 적고 단시간에 큰 강도를 얻을 수 있는 장점이 있다. DCM공법과 같이 연약지반 개량 후 복합지반이 형성되는 지반의 침하량 산정을 위해서는 응력분담비의 결정이 필요하다. 이 연구에서는 DCM공법으로 개량된 복합지반 거동특성을 이해하기 위하여 모형재하시험을 실시하였다. 모형시험에서 측정된 토압과 침하량, 그리고 기존 제안도표를 이용하여 응력분담비를 산정하였는데 응력분담비는 각각 35.4, 28.6, 27.02로 DCM 개량체에 큰 응력집중이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기존 연구결과에 의한 응력분담비(26.52, 32.5)와 비교할 때 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다.

Abstract Deep cement mixing method (DCM) is one of the most effective improving methods for deep soft ground. The strength of soft soil can be increased in a short period of time with less noise and vibration. However, it is necessary to determine the stress transferring and concentration ratio of the composite soft ground for estimating the settlement behaviors. In this study, a model test was undertaken to investigate the stress distribution of the improved soil. Results of the model test shows that stresses were concentrated mainly on the improved areas by DCM and the concentration ratios (35.4, 28.6, 27.02) were obtained using several different techniques. These were well in accordance with other previous research results (26.52, 32.5).

Key Words : Soft ground, deep cement mixing(DCM), Stress concentration ratio, Loading test, Composite ground

1. 서론

해안항만공사는 공사 특성상 해저 연약지반 위에 대형 구조물을 설치해야 하는 어려움이 있다. 연약지반(soft ground)이란 전단강도가 작아 상부에 건설되는 구조물을 지지할 수 없거나, 또는 상부 구조물의 축조로 인해 매우 큰 침하가 발생하는 지반을 말한다[1]. 이러한 압축성이 큰 연약한 점성토지반 위에 구조물을 축조할 경우 연약지반은 상당히 변형되고 이 지반 변형으로 인해 많은 피해가 발생하게 된다. 최근 연약지반 상에 컨테이너 부두

와 같은 대형 중량구조물의 시공이 증가함에 따라 두꺼운 연약층을 단기간에 고강도로 개량해야 하는 경우가 증가하고 있다[2].

우리나라에서 해상지반에 주로 시공되고 있는 연약지반 개량 공법은 크게 모래다짐말뚝공법, 쇄석말뚝공법, 치환공법 등이 있다. 이러한 공법들은 지반의 강도를 개선시키는데 한계가 있으며 두꺼운 연약층에는 적용하기가 어려운 단점이 있다[3]. 이에 따라 해상 지반개량 공사에 심층혼합처리(Deep Cement Mixing, 이하 DCM)공법의 적용이 증가하고 있다. DCM공법은 석회, 시멘트 등의

*Corresponding Author : Byoung-Il Kim

Tel: +82-10-2722-6415 email: bikim@mju.ac.kr

접수일 12년 04월 05일

수정일 (1차 12년 05월 04일, 2차 12년 05월 14일)

게재확정일 12년 07월 12일

개량재를 원위치에서 지중에 공급하여 강제적으로 연약 지반과 혼합 교반함으로써 원지반상에 임의형상의 견고한 안정처리토를 형성하는 공법이다[4]. 특히, 아시아 지역에서는 석회에 비해서 시멘트의 사용이 일반적이고 말뚝의 설치를 위해서 기계적 혼합과 제트(jet)혼합을 사용하고 있다[5, 6]. 또한, DCM 공법은 저소음, 저진동으로 공해가 적고, 단시간에 큰 강도를 얻을 수 있는 장점이 있다. DCM공법은 일본에서 1974년 석회계 심층혼합처리공법이 실용화된 이후 시멘트 모르타르, 시멘트 밀크를 이용한 공법이 개발되었고, 국내에서는 부산 수영하수처리장의 기초, 인천 가좌 하수처리장의 기초, 토류연속벽, 신설부두의 호안기초로 사용한 예가 있다[7]. 또한 태국에서도 고속도로 제방, 빌딩의 기초 및 굴착을 위한 흙막이 구조물 등에 성공적으로 시공된 예가 있다[8, 9].

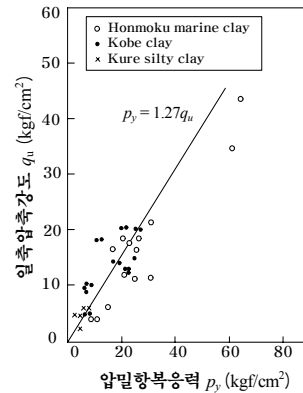
연약지반 위에 고속도로 등의 구조물을 시공할 경우에는 시공 후 발생하는 침하량의 예측 및 관리가 매우 중요한 문제이다[10]. DCM공법과 같이 연약지반 개량 후 복합지반이 형성되는 지반의 침하량 예측을 위해서는 응력분담비(n)의 결정이 필요하다. 시멘트-흙 말뚝의 복합지반에서의 응력분담비(n)는 말뚝 주변 흙의 특성, 말뚝의 크기, 탄성계수, 복합지반에 작용하는 하중의 크기 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다[11]. 하지만 아직까지 국내에서는 DCM공법이 적용된 복합지반의 응력분담비(n) 파악에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 이에 이 연구에서는 DCM공법으로 개량된 복합지반의 응력분담비(n)를 파악하기 위하여 DCM공법으로 개량된 복합지반을 모사하는 지반모형을 제작하여 재하시험을 실시하였다. 모형시험결과로 측정된 침하량 및 토압측정 결과를 이용하여 응력분담비(n)를 산정하였고, 이 결과를 기존 문헌에 제안된 도표를 이용한 계산방법의 결과 및 기존 연구자들의 연구결과와 비교해 보았다.

2. DCM 개량지반의 특성

2.1 DCM 개량지반의 응력분담

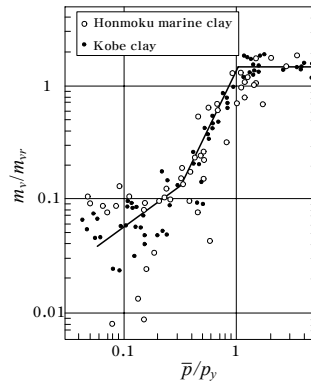
Terashi et al.[12]에 따르면 DCM공법으로 개량된 복합지반의 경우 압밀항복응력 p_y 와 q_u 사이에는 그림 1에서 보는 바와 같이 $p_y = (1.2 \sim 1.3) q_u$ 의 관계를 갖는다. 또한, 개량토의 압밀특성(c_v, m_v)과 미개량토의 압밀특성(c_{vr}, m_{vr})의 비율에서 개량토의 압밀항복응력으로 무차원화한 압밀응력에 대해 정리하면 개량재의 종류, 혼합비, 대상토의 상위에 상관없이 같은 경향을 얻을 수 있

며, 압밀계수 c_v 는 미처리 흙의 10배 이상, 체적압축계수 m_v 는 1/10 이하가 된다고 하였다. 그림 2는 이와 같은 방법으로 체적 압축 계수 m_v 의 변화를 나타낸 것이다.



[그림 1] 일축압축강도(q_u)-압밀항복응력(p_y)[12]

[Fig. 1] Unconfined compressive strength(q_u)-consolidation yield stress(p_y)[12]



[그림 2] $\bar{p}/p_y$ 와 m_v/m_{vr} 의 관계[12]

[Fig. 2] Relationship of $\bar{p}/p_y$ - m_v/m_{vr} [12]

DCM공법이 적용된 개량지반의 응력분담비(n)는 통상 10~20 범위로 설정하지만, 보다 상세하게는 그림 1 및 그림 2를 이용하여 아래의 순서로 추정한다.

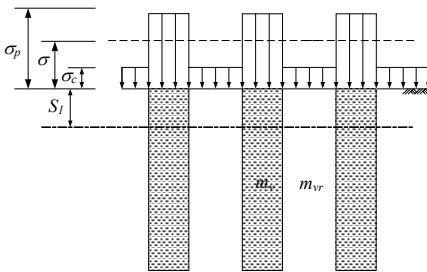
- ① 개량체의 설계기준강도 q_{uck} 에서 말뚝체의 압밀항복응력 p_y 를 그림 1로부터 산정한다.
- ② 상부하중에 의한 평균압밀압력 $\bar{p}$ 와 말뚝체의 압밀항복응력 p_y 와의 비 $\bar{p}/p_y$ 를 산정한다.
- ③ 그림 2로부터 개량체의 체적압축계수 m_v 와 원지반의 체적압축계수 m_{vr} 와의 비, m_v/m_{vr} 을 산정

한다.

④ m_v/m_{vr} 의 역수를 응력분담비 n 으로 한다.

2.2 DCM 개량지반의 침하

DCM 개량지반에 발생하는 응력분담과 침하는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 그림 3과 같은 조건에서 DCM 개량지반에 대한 침하량의 산정에는 개량부에서의 응력 집중을 고려한 다음의 간편식을 자주 사용한다.



[그림 3] 개량지반의 응력 분담 및 침하

[Fig. 3] Stress concentration and settlement of DCM composite ground

$$S_1 = \beta \cdot S_0 \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + a_p(n-1)} \quad (2)$$

여기서, S_1 : 개량지반의 침하량

S_0 : 무처리인 경우의 침하량

β : 침하저감계수

a_p : 개량 면적을

n : 응력분담비

식 (2)에서 응력분담비 n 은 개량부와 미개량부가거의 같이 침하하므로 그림 3을 사용해서 다음 식으로 구하고 있다.

$$n = \frac{m_{vr}}{m_v} \quad (3)$$

[표 1] 시험에 사용된 흙의 특성치

[Table 1] Properties of soil used for test

흙 종류	비중, G_s	아터버그 한계		함수비, $w_n(\%)$	전단 저항각 (°)	압축지수, C_c	압밀계수, $c_v(\text{cm}^2/\text{sec})$	USCS
		LL(%)	PI(%)					
점 토	2.68	39.5	24.5	40±5	-	0.368	3.25×10 ⁻³	CL
쇄 석	2.65	-	-	0	45.0	-	-	GP
모 래	2.68	-	-	0	37.0	-	-	SP

여기서, m_{vr} , m_v : 미개량토 및 개량토의 체적압축계수

3. 응력분담비 측정시험

3.1 시험에 사용된 재료 및 장비

응력분담비 측정시험에서 연약지반과 DCM 개량체의 재료로 점토를 사용하였으며 복합지반 상부, 하부에 쇄석층과 샌드매트의 재료로 각각 쇄석과 모래를 사용하였다 (표 1 참조). 시험에 사용된 DCM 개량체는 7일 양생 후 일축압축강도 3MPa를 만족하는 물시멘트비(W/C) 70%와 고로슬래그 시멘트/점토 배합비 28.5%를 적용하여 제작하였고, 개량체의 형태는 점원식 개량방식을 적용하였다.

연약지반 조성에 사용된 점토를 재성형하여 표준 압밀 시험(KS F 2316)을 하였고, 그 결과로 압축지수(C_c)와 압밀계수(c_v)는 각각 0.368, 3.25×10⁻³cm²/sec로 결정되었다. 연약지반 조성에 사용된 점토는 끓여서 완전히 포화된 조건을 만들었으며, 평균 함수비 40%의 조건에서 간극비(e_0)는 1.072, 포화단위중량(γ_{sat})은 18.1 kN/m³로 산정되었다.

한편, 이 연구에서는 200kPa의 등분포 하중을 지속적으로 재하하기 위하여 약 1MN까지 재하가 가능한 만능시험기(Universal Test Machine(UTM)) (그림 4 참조)를 사용하였다.



[그림 4] 시험에 사용된 만능시험기(UTM)

[Fig. 4] Universal test machine used for test

변위 및 토압의 측정과 자료수집을 위해서 변위계, 토압계 및 데이터 로거를 사용하였으며, 개량지반에 균등한

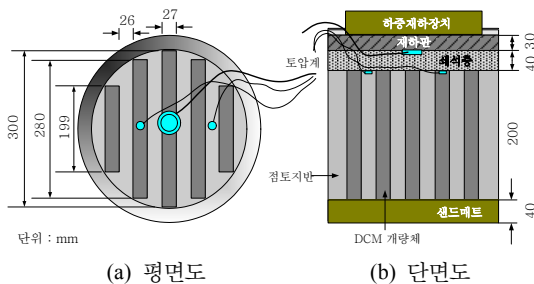
재하를 위하여 29.5×3cm(지름×높이)의 강재 재하판을 사용하였다. 또한, 크기가 31cm×36cm(지름×높이)인 강재 원통형 모형토조를 사용하였다.

3.2 시험내용 및 방법

3.2.1 시험내용

이 연구에서는 DCM 공법이 시공된 복합지반에 등분포 하중이 작용할 때의 DCM 개량체와 점토지반의 응력분담비(n)를 파악하기 위하여 모형시험을 실시하였다. 원통형 모형토조를 이용한 측정시험의 상세도는 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는 바와 같이 토압은 세 지점(점토, DCM 개량체, 상부 쇠석층)에서 측정하였으며, 재하로 인해서 발생하는 침하량은 변위계를 이용하여 측정하였다. 이 연구에서 모형시험과 기존의 제안방법을 이용한 응력분담비(n) 산정방법은 다음과 같다.



[그림 5] 응력분담비 측정시험 상세도
[Fig. 5] Detail drawing of experimental setup

1) 정하중 재하시험

DCM 공법이 적용된 지반을 모사하는 DCM 개량체와 점토의 복합지반에 등분포 하중을 재하하고 토압계를 설치하여 개량체와 점토층에 발생하는 토압을 각각 측정한다. 토압 측정결과를 이용하여 모형복합지반에 발생한 토압분포로부터 응력분담비(n)를 계산한다. 또한, 재하시험 중 복합지반에 발생하는 침하량을 측정하고 무처리 점토지반에 발생하는 침하량을 계산한다. 침하량 측정 및 계산 결과에 대해서 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 응력분담비(n)를 계산한다.

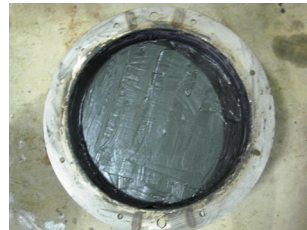
2) 제안 도표를 이용하여 응력분담비 계산

모형시험에 적용된 등분포 하중(=200kPa) 및 개량체의 목표 일축압축강도를 이용하여 기존에 제안된 도표를 이용하여 응력분담비(n)를 계산하고 1)의 정하중 재하시험으로 얻어진 응력분담비(n)의 결과와 비교한다.

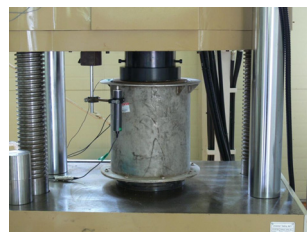
3.2.2 시험방법

DCM 개량체가 시공된 복합지반의 응력분담비(n) 측정시험은 다음의 순서로 실시되었다.

- ① 일축압축강도 3MPa를 만족하는 배합비에 맞게 해수, 점토, 고로슬래그 시멘트를 혼합한다.
- ② 혼합된 점토-시멘트를 치환율($a_s=45.2\%$)에 맞게 미리 제작된 거푸집에 타설한다.
- ③ 타설 1일 경과 후 공시체를 점토 내에서 7일째까지 양생한다.
- ④ 모형토조 바닥에 샌드매트를 조성한 후에 DCM 개량체와 점토의 복합지반을 배치간격에 맞게 조성한 뒤 점토지반의 안정을 위하여 1일간 방치한다 (그림 6 참조).
- ⑤ 점토와 개량체에 토압계를 매설하고 일정한 두께(4cm)로 쇠석층을 조성한다.
- ⑤ 재하판을 설치하고 재하시험기를 이용하여 200kPa의 등분포 하중을 가한다(그림 7 참조).



[그림 6] DCM 개량체-점토의 복합지반 조성
[Fig. 6] Prepared composite ground improved by DCM



[그림 7] 정하중 재하시험 실시
[Fig. 7] Static loading test

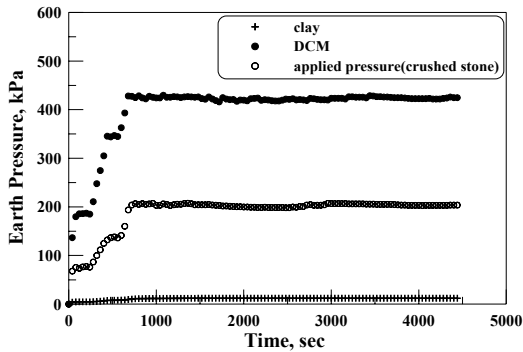
4. 시험결과 및 분석

4.1 모형시험을 통한 응력분담비 산정

4.1.1 토압 측정결과를 이용한 산정

응력분담비(n) 측정시험을 위하여 200kPa의 등분포하

중을 재하하면서 토압계를 이용하여 쇄석층, 점토지반 및 개량체에 작용하는 토압을 측정하였고 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 보는 바와 같이 재하는 3단계로 나누어 실시하였고 목표 등분포 하중인 200kPa의 등분포하중이 가해진 후 평균적으로 개량체에 약 430kPa, 점토지반에 12.2kPa, 쇄석층에 203kPa의 토압이 측정되었다. 모형시험을 통해서 개량체와 점토지반에서 측정된 토압으로 산정된 응력분담비(n)는 약 35.39인 것으로 나타났다.



[그림 8] 재하시간에 따른 토압분포
[Fig. 8] Variations of earth pressures

4.1.2 침하량 측정결과를 이용한 산정

이 연구에서는 응력분담비(n) 산정을 위하여 200kPa의 등분포하중을 재하하면서 토압의 측정과 함께 복합지반에 발생하는 침하량을 측정하였고 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 보는 바와 같이 재하로 인해서 복합지반에는 총 6.32mm의 침하가 발생하였다. 이 침하량은 복합지반과 복합지반 상하부에 위치한 쇄석층과 샌드매트에 발생한 전체 침하량이다. 동일한 조건의 무보강 점토지반에 발생하는 압밀침하량은 표 1에 제시한 점토의 물성치와 초기 유효연직응력($\sigma_{v0}'=18.1\text{kPa}$), 초기 간극비($e_0=1.072$)를 식 (4)에 대입하여 계산할 때 약 85mm로 산정된다.

$$\Delta H = \frac{C_c}{(1+e_0)} H_0 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{v0}' + \Delta \sigma_v'}{\sigma_{v0}'} \right) \quad (4)$$

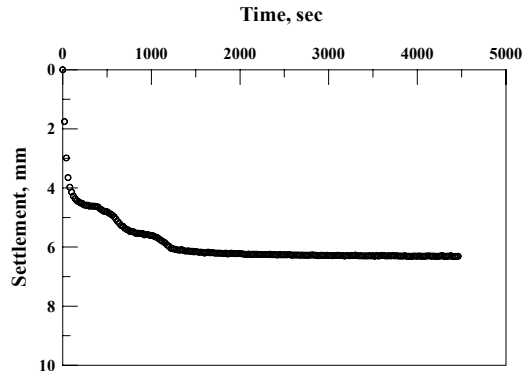
여기서, ΔH : 압밀 침하량

σ_{v0}' : 초기 유효연직응력

$\Delta \sigma_v'$: 외부하중에 의한 유효응력 증가량

계산의 편의를 위하여 복합지반 재하시험에서 측정된 전체 침하량을 DCM으로 개량된 복합지반에 발생한 침

하량이라고 가정할 때, 무보강 점토지반의 침하량(85mm)과 DCM으로 개량된 복합지반의 침하량(6.32mm)을 식 1에 대입하여 침하저감계수(β)는 0.0744로 결정되었다. 이렇게 산정된 침하저감계수 0.0774와 식 (2)를 이용해서 계산된 응력분담비(n)는 28.52이다.



[그림 9] 재하시간에 따른 침하량
[Fig. 9] Variations of settlement

4.2 기존 연구결과와 비교

이 연구에서는 모형시험에서 산정된 응력분담비(n)를 기존 제안도표에 의한 결과와 현장시험결과에 의해서 산정된 응력분담비(n)와 비교해 보고자 하였다. 실제 현장시험결과와 비교한 경우 이 연구에서 적용된 지반 조건과 개량체의 특성이 반영된 현장에서 실시된 시험결과와 비교하는 것이 가장 이상적이라 할 수 있다. 하지만 이 연구에서는 현장시험을 실시하지 못한 관계로 DCM 공법을 적용한 해외 현장시험 사례를 인용하여 응력분담비(n)를 비교하였다.

4.2.1 기존 제안도표를 이용한 응력분담비 산정

이 연구에서 사용된 개량체의 일축압축강도 3MPa과 등분포하중 200kPa를 이용하여 2.1절에서 설명한 그림 1과 2 및 응력분담비 산정순서에 따라 m_v/m_{vr} 는 약 0.037로 결정되었고 m_v/m_{vr} 의 역수인 응력분담비(n)는 27.02로 산정되었다.

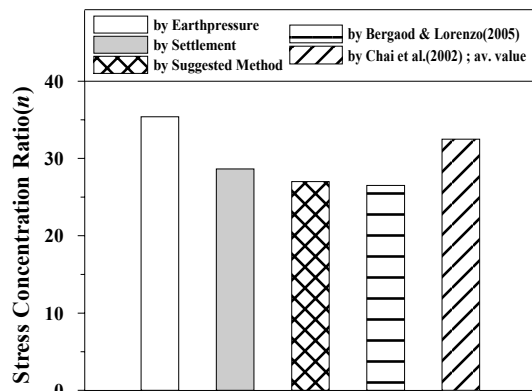
4.2.2 기존 연구결과

Bergado & Lorenzo[13]는 15kPa 이하의 비배수 강도(현장 베인시험(FVT) 결과)를 갖는 연약 점토층(soft Bangkok clay)에 대한 현장시험을 통해서 DCM 개량지반의 침하저감효과를 확인하였다. 1.5m 간격의 사각배치로 직경(D) 0.5m, 길이(L) 9.0m의 심층혼합말뚝(deep

mixing pile)을 설치하여 복합지반을 조성한 후 6m 높이로 성토를 한 후에 침하량을 측정하여 무처리 지반의 침하량과 비교하였다. 이 연구결과에 따르면 성토하중 재하 1년 후의 평균 침하량은 DCM으로 개량된 복합지반의 경우 310mm, 무처리 지반의 경우 1000mm로 나타났다. 복합지반과 무처리 지반의 침하량을 통해서 침하저감계수(β)는 0.31로 결정되었고 식 (2)를 이용해서 계산된 응력분담비(n)은 26.52로 산정되었다.

Chai et al.[10]은 중국 동쪽 Xu-Lian 고속도로 현장 중 Lian-Yun-Gang구역(약 31km)에서 흙-시멘트 말뚝으로 개량된 구간(약 17km)에 대해서 현장 침하량 계측치를 이용한 역해석을 실시하였다. 이 현장은 0.5m 직경(D)의 흙-시멘트 말뚝을 1.1~1.6m 간격의 삼각형 배치로 시공하였고 말뚝은 지층에 0.5m 깊이까지 시공되었다. Chai et al.[10]의 응력분담비에 대한 역해석 결과에 따르면 배치 간격의 변화로 인한 치환율(a_s)의 증가에 따라서 $n=20\sim45$ 값(평균 32.5)을 나타내었다.

그림 10은 4.1절의 모형시험결과와 기존 연구결과에 대한 응력분담비(n)를 비교한 것이다. 그림 10에서 보는 바와 같이 모형시험결과와 기존 제안도표를 이용하여 산정된 응력분담비(n) 중에서 기존 제안도표를 이용하여 산정된 응력분담비가 가장 작고, 토압계를 이용하여 직접 측정을 한 경우가 가장 큰 것으로 나타났으며 그 차이는 약 8.4이다. 한편 침하량으로 산정된 응력분담비(n)는 기존 제안도표를 이용하여 산정된 응력분담비(n)에 가까운 결과를 나타내었다. 하지만 침하량으로 산정된 응력분담비(n)의 경우 채석층 및 샌드매트의 탄성침하는 무시되었으므로 이를 고려할 경우 응력분담비(n)는 산정된 값에 비해서 좀 더 커질 것으로 판단된다.



[그림 10] 모형시험과 기존 연구결과의 응력분담비(n) 비교
[Fig. 10] Comparison of stress concentration ratio(n)

기존 연구결과와 역시 모형시험결과와 제안도표를 이용한 결과와 유사한 결과를 보였고, Bergado & Lorenzo[13]의 연구결과는 침하량으로 산정된 응력분담비(n) 및 제안도표를 이용하여 산정된 응력분담비(n)와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 볼 때 DCM으로 개량된 복합지반의 응력분담비(n)는 여러 조건에 대한 영향을 받긴 하지만 일정한 범위 내에서 변화할 것으로 예측된다.

앞서 서론에서 언급한 바와 같이 응력분담비(n)는 말뚝 주변 흙의 특성, 말뚝의 크기, 탄성계수, 복합지반에 작용하는 하중의 크기 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있고, Chai et al.[10]의 연구결과와 같이 유사한 조건에서도 치환율(a_s)의 변화에 따라서 그 값이 변하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 DCM 공법의 설계에 필요한 응력분담비(n) 파악을 위해서는 응력분담비(n)에 영향을 미치는 다양한 조건에 대한 추가적인 연구를 통해서 응력분담비의 변화를 파악해야 할 것으로 생각된다.

5. 결론

이 연구에서는 DCM공법으로 개량된 복합지반의 응력분담비(n)를 파악하기 위하여 모형시험을 실시하였다. 모형시험결과로부터 응력분담비를 산정하였고, 이 결과를 도표를 이용한 계산방법의 결과 및 기존 연구자들의 연구결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) DCM공법을 적용한 복합지반의 토압측정과 침하량 계산으로 산정된 응력분담비(n)는 각각 35.4, 28.6으로 산정되어 DCM 개량체에 큰 응력집중이 발생하는 것으로 나타났다.
- 2) 기존 제안도표를 이용하여 산정된 응력분담비(n)는 27.02로 토압측정으로 산정된 응력분담비(n)에 비해서 침하량으로 산정된 응력분담비(n)에 가까운 결과를 나타내었다.
- 3) 이 연구에서 산정된 응력분담비(n) 및 기존 연구결과의 응력분담비(n)는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났으며, 이러한 결과를 볼 때 응력분담비(n)는 여러 조건에 대해서 일정한 범위 내에서 변화할 것으로 예측된다.
- 4) 응력분담비(n)가 다양한 조건에 대해서 영향을 받는 것을 고려할 때, 다양한 조건에 대한 추가적인 연구를 통해서 응력분담비(n)를 파악한다면 현장

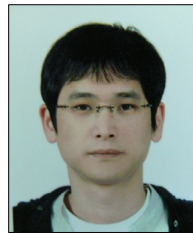
에서 DCM공법 설계에 적용할 수 있는 좀 더 정확한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] M. M. Kim, B. I. Kim, S. W. Lee and S. M. Cho, "Design of Soft Ground Saeron Publishing Company", 2004.
- [2] B. W. Shin, T. U. Jung, J. W. Lee, S. Y. Cho and J. Y. Lee, "A Study on Deep Mixing Method of Reinforced Marine Clay using Cement treated Wall-type", 1998 Korean Society of Civil Engineers National Conference, Vol.1998, No.2, pp.256-258, 1998.
- [3] Y. Heo and C. K. Lee, "A Study of Deep Mixing Method by Centrifugal Model Experimentals", Journal of Ind. Sci. and Tech. Institute, Vol.7, No.1, pp.39-54, 1993.
- [4] J. H. Kim, "A Study on the Seismically-Induced Lateral Displacements of Caisson Quay Walls on Improved Soils", Master thesis, Dept. of Civil Eng., Yonsei Univ., 2001.
- [5] M. Kamon and D. T. Bergado, "Ground Improvement Techniques", Proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok, Thailand, Vol.2, pp.526-546, 1991.
- [6] A. Porbaha, "State of the Art in Deep Mixing Technology. Part I : Basic Concepts and Overview", Ground Improvement, 2, pp.81-92, 1998.
- [7] Y. Heo and C. K. Lee, "A Study on Deep Mixing Method of Reinforced Clay Foundation Using Cement Treated Piles", Journal of the Institute of Construction Technology, Vol.12, No.2, pp.33-43, 1993.
- [8] D. T. Bergado, T. Ruenkairergrsa, Y. Taesiri and A. S. Balasubramaniam, "Deep Soil Mixing to Reduce Embankment Settlement", Ground Improvement J., Vol.3, No.3, pp.1-18, 1999.
- [9] K. Petchgate, P. Jongpradist and S. Panmanajareonphol, "Field Pile Load Test of Soil-Cement Column in Soft Clay", Proceeding of the International Symposium 2003 on Soil/Ground Improvement and Geosynthetics in Waste Containment and Erosion Control Applications, Asian Institute of Technology, Thailand, pp.175-184, 2003.
- [10] J. C. Chai, S. Y. Liu and Y. J. Du, "Field Properties and Settlement Calculation of Soil-Cement Column Improved Subsoil-A Case Study", Lowland Technology International, Vol.4, No.2, pp.51-58, 2002.
- [11] J. Zheng and H. Huang, "Analytical solution of pile-soil stress ratio of soil-cement", Rock and Soil Mechanics(in Chinese), Vol.26, No.9, pp.1432-1436, 2005.
- [12] M. Terashi, T. Okumura and T. Mitsumoto, "Report of The Port and Harbour Research Institute: Fundamental Properties of Lime-Treated Soils(1st Report)", Ministry of Transport(Japan). Vol. 16, No.1, pp. 3-28, 1997.
- [13] D. T. Bergado and G. A. Lorenzo, "Ground Improvement(Case Histories): Chapter 11; A Full-Scale Study on Cement Deep Mixing in Soft Bangkok Clay", Elsevier Geo-Engineering Book Series, Vol.3, 2005.

유 완 규(Wan-Kyu Yoo)

[정회원]



- 2006년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2011년 8월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 명지대학교 BK21 토목 고등설계 교육원 박사 후 연구원

<관심분야>

토질역학, 기초공학

김 병 일(Byoung-Il Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

토질역학, 기초공학

김 영 욱(Young-Uk Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 : The Pennsylvania State University 토목환경공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

토양오염 복원, 음향방출, 토질역학, 기초공학