

교대말뚝기초의 측방유동에 관한 원심모형실험 Centrifuge Model Experiments for Lateral Soil Movements of Piled Bridge Abutments.

최 동 혁* 정 길 수** 박 병 수*** 유 남 재****
Choi, Dong-Hyurk Jeong, Gil-Soo Park, Byung-Soo Yoo, Nam-Jae

Abstract

This paper is an experimental result of investigating lateral soil movements at piled bridge abutments by using the centrifuge model facility.

Three different centrifuge model experiments, changing the methods of ground improvement at bridge abutment on the soft clayey soil (no improvement, preconsolidation and plastic board drains (PBD), sand compaction pile (SCP) + PBD), were carried out to figure out which method is the most appropriate for resisting against the lateral soil movements. In the centrifuge modelling, construction process in field was reconstructed as close as possible. Displacements of abutment model, ground movement, vertical earth pressure, cone resistance after soil improvement and distribution of water content were monitored during and after centrifuge model tests.

As results of centrifuge model experiments, preconsolidation method with PBD was found to be the most effective against the lateral soil movement by analyzing results about displacements of abutment model, ground movement and cone resistance. Increase of shear strength by preconsolidation method resulted in increasing the resistance against lateral soil movement effectively although SCP could mobilize the resistance against lateral soil movement. It was also found that installment with PBD beneath the backfill of bridge abutment induced effective drainage of excess pore water pressure during the consolidation by embanking at the back of the abutment and resulted in increasing the shear strength of clay soil foundation and eventually increasing the resistance of lateral soil movement against piles of bridge abutment.

키워드 : 원심모형실험, 측방유동, 선행재하압밀공법, 플라스틱보드드레인공법, 모래다짐말뚝공법

Keywords : *Centrifuge model experiment, Lateral soil movement, Plastic board drain method, Preconsolidation method, Sand compaction pile method*

1. 서론

현대산업사회는 급격한 경제규모의 확대와 인구 증가에 의해 사회기반시설의 건설에 필요한 건설

부지가 요구됨에 따라 지반이 연약한 지역을 개량하여 새로운 건설부지로 이용하고 있다. 증가되는 운송물량을 운반하기 위하여 전국 각지에 산업도로의 건설이 활발하게 이루어지고 있는데 최근에는 교량을 지지하는 교대, 항만시설을 위한 도로나 옹벽등이 연약지반에 시공되는 경우가 많아지고 있다.

이러한 연약지반에 성토나 매립을 실시하거나,

* 강원대학교 토목공학과 석사과정

** 강원대학교 토목공학과 박사수료

*** 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사

**** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

도로 및 구조물을 건설하게 되면 편재하중을 받게 되고, 지중에는 하중에 의한 응력이 증가하여 간극수압이 소산되면서 체적수축현상이 일어나면서 지반의 침하가 발생한다. 그러나 간극수압의 소산에 필요한 시간이 지나기도 전에 지속적으로 하중이 증가되면, 지반내의 과잉간극수압이 다시 증가하게 되어 측방유동압이 작용하게 되므로 토립자의 소성화의 진행에 의한 수평적인 측방변위가 발생하고 자유표면에는 용기현상이 발생하여, 결국에는 국부적인 전단파괴를 유발하여 구조물의 안정에 영향을 미친다. 이러한 연약지반의 소성적인 측방 변형현상을 측방유동 또는 소성유동이라고 한다.

지반의 측방유동에 관한 연구는 1969년 Peck에 의하여 처음 거론되었고, 측방유동압에 관한 Tschebotarioff(1973)의 연구발표 이후에 De Beer(1977) 등 여러 학자들에 의해 인접한 편차 성토하중으로 발생하는 측방유동에 의한 지반-토류 구조물의 안정성 문제에 대한 심각성이 제시되었다. 이와 함께 배면 뒷채움, 야적, 매립, 급속한 절·성토, 지반굴착시 발생하는 편재하중 등으로 발생하는 측방유동에 의한 토류구조물의 피해사태가 확화나 연구보고서 등을 통해 다수 보고되었다.

일반적으로 측방유동이 발생될 가능성을 보이는 연약지반에 교대기초말뚝을 설치하게 되면 말뚝은 지반에 대한 측방유동에 저항하게 된다. 그러나 원지반 상태가 불안정한 연약지반상에서 기초말뚝만으로 측방유동에 저항하기에는 크게 부족하기 때문에 결국 상부구조물은 수평으로 이동할 수 밖에 없게 된다. 결과적으로 이러한 현상은 구조물 설치 후 피해규모가 매우 크기 때문에 그 대책에 관한 공법이 많이 연구되고 있다. 그러나 아직도 일부 교대는 설계시 연약지반의 측방유동에 대한 검토를 실시하지 않고, 적절한 공법을 제시하지 않아 시공 중에 대책공법을 선정하여야 하는 제한성이 있기 때문에 교대 시공 후에 대책공법을 시공함으로 인한 2차 변위 발생문제로 손실이 유발될 수 있다. 현재 합리적인 설계법이 확립되어 있지 않은 점에도 기인하지만 구조물이 측방유동을 받는지 여부를 판정하기가 곤란하고, 또한 측방유동 현상은 연약지반의 강도특성, 지중조건 그리고 성토하중 조건 등에 따라 지반의 압밀과 전단현상이 복합된 형태로 나타나기 때문에 측방유동을 고려한 설계를 하는데 대한 어려운 점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 교대말뚝기초의 측방유동에 가장 중요한 영향을 미치는 변수인 지반조건과 성토지반 시공속도를 기본조건으로 하여 무보강, 선행재하하중+PBD 타설, PBD+SCP 타설 총 3 종류의 지반보강형태에 대한 원심모형실험을 실시하여 교대가 받는 측방유동의 발생 메카니즘을 연약지반상의 성토와 관련하여 연구하고, 측방유동을 저감시킬 수 있는 지반보강 및 대책공법들에 대한

실험을 통해 연약지반의 구조물 설계시 구조물이 받게 되는 피해를 분석하여 그 거동을 예측함으로써 측방유동압을 받는 교대말뚝기초의 설계시 제시된 지반개량공법의 개량효과에 대하여 비교분석한 것을 목적으로 하고 있다.

2. 실험방법

실험에 사용될 원지반 시료와 모래다짐말뚝으로 사용될 주문진 표준사에 대한 물리적 특성을 파악하기 위해 기본물성실험을 실시하였으며, 원지반에 무보강, 선행재하하중+PBD타설, PBD+SCP타설의 지반보강조건을 적용하여 인접성토하중에 의한 교대의 측방유동을 파악하기 위한 원심모형실험을 수행하였다.

2.1 기본물성

본 연구에 사용된 점토시료, 주문진표준사 등에 대한 물리적 특성을 파악한 결과 점토시료의 경우 비중은 평균 2.74로 나타났으며, 노건조 시료를 이용하여 실시한 액·소성한계 실험결과 액성한계 41.7~45.1%, 소성한계 20.20~21.84%, 소성지수 21.5~23.3%의 분포를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 주문진표준사의 경우 균등계수 1.2의 SP로 분류되는 매우 균등한 입도분포를 지닌 것으로 나타났다.

2.2 원심모형실험

장관파일을 타설하고 교대가 설치된 지반에 지반보강조건에 따라 발생하는 교대의 변위 특성을 파악하기 위하여 원심모형실험을 실시하였다. 교대 모형실험은 무보강, 선행재하하중+PBD타설, PBD+SCP타설의 조건으로 나누어 실험을 실시하였다.

2.3 모형지반 조성

교대하부지반을 모사하기 위하여 강제압밀토조를 이용하여 모형지반을 성형하였는데, 먼저 시료를 토조에 넣기전에 기반암을 모사하기 위해 MC(아세탈)판을 토조바닥에 설치하고 MC판에 구멍을 뚫어 다공판을 삽입함으로써 양면배수조건에 적합하도록 하였고, 먼저 초기함수비 90%내외의 조건으로 시료를 균질하게 교반 다음 그림 4에 나타낸 바와 같이 강제압밀 토조에 시료를 투기한 다음 공기압을 이용하여 최대 0.2kgf/cm^2 의 압밀하중을 단계적으로 재하하였다. 강제압밀된 시료의 평균함수비는 53%의 분포를 보이는 것으로 나타났으며, 강제압밀 후에 중력수준 60G조건에서 원심모형시험기를 사용하여 4시간동안 자중압밀을 실시하여 시료의 평균높이는 12cm로 준비하였다.

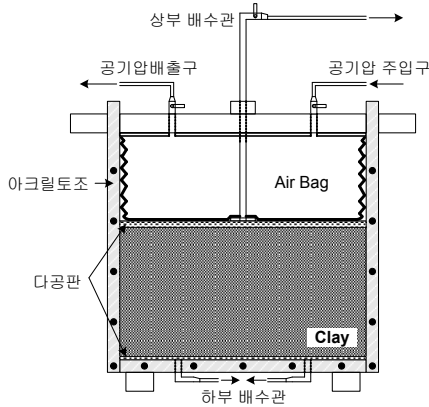


그림 1 원지반 점토시료 성형장치

2.4 실험 및 지반조건

본 논문에서는 연약지반에 시공된 강관말뚝기초를 각각의 주어진 지반보강 조건에 맞추어 보강을 하고 원심모형실험으로 재현하여 측방유동을 받는 연약지반내 교대말뚝기초의 거동특성을 분석하였다. 본 실험에서는 교대말뚝기초의 측방유동에 가장 중요한 영향을 미치는 변수로서 지반조건과 성토속도 그리고 지반보강조건들을 고려하여 총 3가지의 원심모형실험을 실시하였다. 지층조건은 표 2에 나타난 바와 같이 점토층과 성토층 아래에 풍화암지대가 위치한 것을 알 수 있는데 원심모형실험 모사시 각각 구분을 하여 물성을 다르게 적용하였다. 그리고 성토지반의 시공속도를 나타내는 하중재하조건은 한계성토고까지 단계별로 재하하는 방법(5cm/day)을 택하였다.

표 2 교대하부지반의 현장 지층조건

교대		A	B
지층조건	성 토 층 (m)	14.04	12
	점 토 층 (m)	12	12
	모래자갈층(m)	1.3	3
	풍 화 토 (m)	5.1	3.7
	풍 화 압 (m)	6.3	8.8

위에서 언급했듯이 본 실험은 자중압밀이 완료된 모형지반에 각 실험조건에 적합하게 강관파일과 교대를 설치하여 보강을 실시한 다음 단계적인 배면성토를 실시하여 배면성토하중에 의한 하부 연약지반의 측방유동 특성과 말뚝기초의 거동을 관찰하고자 원심모형실험을 수행하였다. 원심모형실험에서는 현장조건을 기준으로 상사성을 고려하여 축소된 모형실험을 수행하고 있으나, 주어진 시험조건과 현재 보유하고 있는 토조제원을 고려한 결

과 현장조건을 기준으로 상사법칙을 적용하는 경우 모형토조의 제원을 초과하므로, 본 실험에서는 현장조건을 1/2 크기로 축소시킨 상태에서 상사법칙을 적용하여 산출된 지반조건(제원)을 적용하였다. 실험시 적용될 지반보강에 사용되는 보강재의 사용여부는 아래 표 3에 나타내었다.

표 3 지반보강 실험조건

실험조건	무보강	선행하중재하+PBD보강	PBD + SCP
강관파일 타설	YES	YES	YES
PBD타설	NO	YES	YES
SCP타설	NO	NO	YES

2.5 교대측방유동 실험

강제압밀과 자중압밀이 완료된 시료를 원심모형 실험용 토조에 결합을 하고 계측장비와 보강조건을 적용을 완료한 후 실험을 실시하였다. 첫번째 무보강 조건은 지반에 4mm의 강관파일을 중심간격 1.25cm간격으로 타설하고 강관파일 상부에 교대를 설치한 후 단계별 배면성토를 실시하였다. 배면성토는 성토높이 10cm를 4단계로 나누어 성토하였는데, 3단계까지는 압밀시간 30분을 유지하였으며 최종성토(4단계)후에는 2.5시간동안 원심모형실험을 실시하여 장기적 거동을 관찰하였다. 두 번째 선행압밀재하하중+PBD 보강 실험조건인 경우 강관파일과 교대를 설치하기 전에 2.5×2.5cm 간격으로 배수재를 타설한 후 4단계에 걸쳐 Sand Mat를 포설하여 각 단계별로 30분씩 선행재하하중성토를 실시하였다. 그 후에 Sand Mat를 절토하여 강관파일 및 교대설치한 다음에 복토하여 압밀을 실시하였다. 마지막 SCP+PBD 보강조건인 경우 두 번째 실험조건과 비슷한 방법으로 강관파일과 교대설치전에 PBD와 SCP를 먼저 타설한다. PBD는 두 번째 실험조건과 같이 타설을 하고 SCP는 직경 1cm로 제작하여 말뚝중심간격 1.7cm로 치환율 27%의 조건으로 설치하였다. 이후의 실험단계는 무보강실험 조건에서 언급한 바와 같이 강관파일 타설 후 교대를 안치시키고 시간조건에 따라 4단계에 걸쳐 배면성토를 하여 각 단계별로 침하량이 수렴할 때 까지 실험을 지속하면서 토압, 간극수압, 지표침하량, 교대변위 등을 측정하였다. 실험이 종료된 후에 교대옹벽의 전면과 배면 지점에 대하여 깊이에 따른 콘저항력값을 측정하기 위하여 콘실험을 실시하였으며, 모형토조를 해체하여 성토부, 강관파일 타설부, 교대전면부로 지반을 세부부분으로 나누어 지반 최하부부터 지표까지 1cm 등간격으로 함수비를 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 뒷채움 원지반의 침하거동

그림 2 는 각 지반보강조건들에 대하여 교대배면 성토에 의한 원지반 침하량의 시간경과에 따른 변화량을 나타낸 것이다. 그림 2(a)를 보면 1단계 성토 직후 0.12cm의 침하가 발생하였다. 이것은 현장조건에서는 7.2cm(=0.12cm×60G)의 침하를 나타낸다. 그 이후 30분동안의 기록 후 침하량 0.1cm가 발생하였고, 2, 3, 4단계 성토직 후 각각 0.21cm, 0.22cm, 0.41cm의 침하량이 발생하였으며, 30분동안의 가속동안 2단계와 3단계 후 0.19cm, 0.18cm의 침하량이 발생하였다. 4단계 이후는 장기적으로 0.3cm의 침하량이 발생함을 알 수 있었다. 그림 2(b)는 원지반에 대한 단계별 선행하중재하성토에 의한 연직침하량의 시간적 변화와 교대옹벽 설치 후 뒷채움 성토에 의한 연직침하량의 변화를 나타낸다. 단계성토하중직 후 급격한 연직침하 발생 후 시간경과에 따라 압밀침하가 서서히 진행되었음을 알 수 있다. 단계별 최종성토 후에 전체 침하량은 1.66cm로 나타났으며 교대옹벽 설치 후 1단계의 옹벽 뒷채움재의 순간배면 성토 후에는 0.44cm로 그림 2(a)의 무보강시의 뒷채움에 의한 최종침하량에 비하여 매우 작은값의 침하량이 발생함을 알 수 있어서 원지반에 대한 선행재하공법에 의한 침하량 저감효과가 있음을 알 수 있다. 그림 2(c)는 4단계의 뒷채움 성토하중에 따라 하중재하 즉시 침하가 발생하고 시간경과에 따라 연직배수재를 통한 압밀침하가 진행되었음을 알 수 있다. 이와같이 실험조건에서의 침하량의 형태 및 크기는 그림 2(a)의 무보강 경우와 유사함을 알 수 있다. 그림 2(b)의 선행재하성토하중에 의한 PBD설치 실험조건에 비하여 전체 침하량은 크게 나타났음을 알 수 있다. 침하량 측정위치가 PBD설치구간에 측정하였기 때문에 무보강의 경우와 유사한 침하양상을 나타낼 수도 있으나 SCP보강타설에 의한 연직 침하량 저감효과는 크게 나타나지 않았음을 알 수 있다.

3.2 교대옹벽배면 뒷채움 성토하중에 의한 연직토압

그림 3은 뒷채움 성토하중에 의한 토압분포를 나타내고 있다. 그림 3(a)에 나타낸 바와 같이 각 단계별로 0.162 kgf/cm², 0.507 kgf/cm², 0.685 kgf/cm², 0.690 kgf/cm²의 토압증가를 나타내고 있으며, 그림 3(b)도 단계별 선행성토하중에 의하여 각각 0.185 kgf/cm², 0.342 kgf/cm², 0.391 kgf/cm², 0.458 kgf/cm² 그리고 교대설치 후 배면성토에 의해 0.723 kgf/cm²의 연직응력 증가가 있음을 확인 할 수 있다. 주문진 성토재의 단위중량

$\gamma_d = 1.68 \text{ kgf/cm}^3$ 와 성토높이 3cm를 고려하였을 때 연직응력이 0.3 kgf/cm²가 됨을 알 수 있으며 실험측정값과 유사한 범위에 있음을 알 수 있다. 같은 방법으로 배면성토하중에 대한 연직응력도 유사한 범위에 있음을 알 수 있었다. 그림 3(c)는 단계별 옹벽 배면 성토하중에 의하여 SCP와 점토지반에 전달된 연직유효응력의 변화를 도시한 것이다. 강성의 다짐모래말뚝 기둥에 응력이 집중되고 점토지반에는 감소된 응력이 전달되고 있음을 알 수 있다.

3.3 콘저항치의 변화

그림 4은 실험종료 후 교대옹벽의 전면과 배면의 지점에 대하여 콘저항실험을 실시하고 결과를 도시한 것이다. 그림 4(a)에 나타낸 바와 같이 콘전단의 저항하중의 변화가 연직점토지반 깊이에 따라 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 측정결과는 하부지반의 자중압밀에 의하여 정규압밀 점토화하여 깊이에 따라 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 뒷채움재의 성토하중에 의한 압밀에 따른 하부지반의 전단저항력의 증가는 없음을 알 수 있다. 그림 4(b)에서는 전면부분의 콘저항값의 깊이별 변화는 별다른 차이없이 동일한 값으로 나타남을 알 수 있다. 이는 선행재하하중에 의한 압밀효과로 과압밀토가 되었음을 알 수 있다. 배면부분의 콘저항값은 깊이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 옹벽배면 뒷채움재의 성토하중에 의하여 PBD의 연직 배수재를 통한 하부 점토지반의 압밀이 진행됨에 따라 강도증진 효과가 발생한 것으로 판단된다. 이와같은 결과는 옹벽배면하부지반의 강도증진효과로 교대의 측방유동에 대한 수평저항력을 증진시켜줄 수 있을 것으로 예상된다. 그림 4(c)의 콘저항치의 변화를 보면 지반 보강이 수행되지 않은 구간에서의 콘저항치는 깊이 증가에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있고 그의 변화형태는 그림 4(a)의 무보강 실험조건인 콘저항치 변화와 매우 유사한 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편 PBD로 보강하고 옹벽배면에 뒷채움재를 성토한 구간의 콘저항치는 깊이별로 증가하는 경향을 나타내고 있으며 그의 변화양상은 그림 4(b)의 PBD 설치실험과 매우 유사한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와같은 결과로 서로 다른 3가지 실험조건에서 점토지반의 콘저항치 변화, 즉 점토지반의 전단저항력 변화는 함수비 측정결과와 일관성있게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 본 실험조건에서도 배면성토하중에 따라 압밀이 진행되면서 그의 하부지반의 전단강도가 증가하였음을 알 수 있다. 이와같은 결과로 교대옹벽 말뚝기초의 측방유동에 대한 활동력을 감소시켰을

것으로 판단된다.

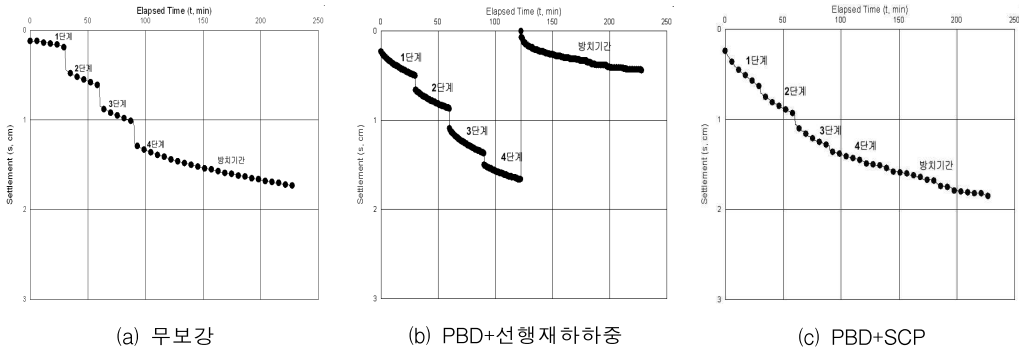


그림 2 시간-침하량 곡선

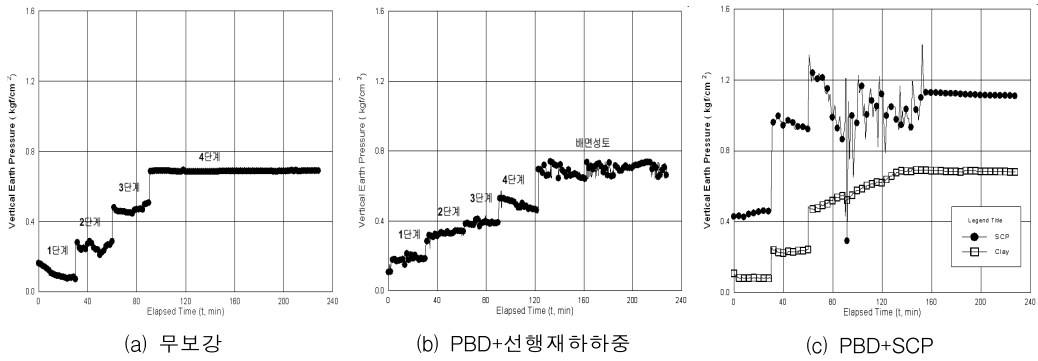


그림 3 성토하중에 따른 토압변화

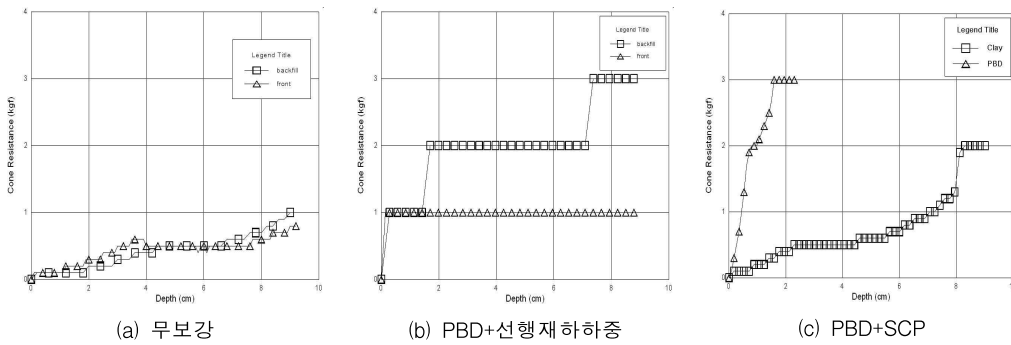


그림 4 깊이에 대한 콘저항력

3.4 교대변위발생 형태

그림 5은 교대설치 후 뒷채움재 성도후에 발생한 교대의 변위 발생형태를 도시한 것이다. 그림 5(a)는 옹벽의 Toe에서 발생한 수평변위와 연직변위의 성도 단계별 변화를 나타낸 것으로 1, 2, 3, 4 단계에서 수평변위는 일관성있게 증가함을 알 수 있으며 연직변위는 수평변위에 비하여 약 1/4범위로 분포하고 있으며 단계별 성도에 따라 점진적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 최종성도 단계에서의 수평과 연직변위는 각각 0.5cm, 1.25cm로 현장조건을 고려할 때, 0.3m (0.5×60G), 0.75m (=1.25×60G)의 크기임을 알 수 있다. 그림에서 본 바와 같이 뒷채움 성도에 따라서 뒷채움 하부지반은 성도 하중에 의하여 연직방향의 압밀이 약간 발생하였으나, 하부지반의 측방유동에 의하여 옹벽이 설치된 하부지반에 수평방향으로 크게 변위가 발생되었음을 알 수 있다. 따라서, 무보강지반에서는 배면성도하중에 의하여 측방유동이 크게 발생할 수 있음을 알 수 있다. 그에 비하여 그림 5(b)를 보면 무보강경우에 비하여 수평변위가 현저히 감소한 것을 알 수 있었다. 이것은 선행재하 하중에 의하여 과압밀된 원지반에 의한 전단저항력의 증가로 뒷채움 성도하중으로 인한 측방유동에 대한 교대 옹벽의 수평변위가 적게 나타남을 알 수 있다. 수평변위는 0.5cm가 발생되었으며, 연직변위는 거의 변화없는 0.1cm가 측정되었다. 그림 5(c)는 무보강 시험결과에 비하여 수평변위가 적게 발생하였고 연직침하는 거의 발생하지 않았음을 알 수 있다. 이와같은 결과는 PBD의 설치에 따른 뒷채움 성도 하중에 의한 하부지반의 압밀효과에 의한 강도증진 효과와 옹벽하부지반의 SCP설치에 의한 지반 개량효과에 기인한 것으로 판단된다. 그러나, 그림 5(b)의 선행재하하중 + PBD설치실험 조건과 비교하였을 때 본 실험조건에서는 수평변위는 크게 발생하였고, 연직침하는 동일한 값으로 거의 발생하지 않았음을 알 수 있다. 이와같은 결과는 SCP타설효과가 선행압밀 하중재하조건에 비하여 교대 옹벽의 측방유동 저항효과가 크지 않은 것으로 추정할 수 있다. 그림 5(c)에서 알 수 있듯이 수평변위는 단계성도하중에 따라 점진적으로 증가한 반면에 연직침하는 매우 미미함을 알 수 있다.

3.5 성도하중에 의한 지반침하형태

그림 6는 실험초기와 실험종료 후 지반변위 발생형태를 사진 촬영한 결과를 토대로 스케치한 결과이다. 그림 6(a)를 보면 뒷채움 성도에 따라서 뒷채움 하부지반은 성도하중에 의하여 연직방향의 압밀이 약간 발생하였으나, 하부지반의 측방유동에

의하여 옹벽이 설치된 하부지반에 수평방향으로 크게 변위가 발생되었음을 알 수 있다. 따라서, 무보강지반에서는 배면성도하중에 의하여 측방유동이 크게 발생할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6(b)는 원지반에 선행재하 성도하중을 가하였을 때 지반변형 형태와 교대 옹벽 배면성도후의 지반변형을 도시한 것이다. 초기상태에 비하여 선행재하 성도 하중 후 전지반이 연직압밀침하에 의하여 지반의 전반적인 변형이 발생하였음을 알 수 있다. 한편 선행재하 성도하중 후의 지반변위와 옹벽배면 뒷채움의 성도후의 변위 발생현황을 비교하여 보면 뒷채움부분에서는 연직침하가 발생하고 있으나, 수평변위는 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 6(b)의 콘저항치 변화에서 알 수 있듯이 전지반에 걸쳐 선행재하 하중에 의하여 지반의 전단강도가 증가하였으며 뒷채움재 지반에서는 콘저항치가 옹벽전면지반에 비하여 증가하였음을 알 수 있다. 이것은 그림 6(b)의 지반 변형도에서 알 수 있듯이 뒷채움 하중에 의하여 연직압밀침하가 발생하고 그에 따라 지반의 전단강도가 증가한 것으로 판단된다.

이것은 뒷채움재의 성도하중으로 인한 과잉간극수압 발생이 연직 PBD재를 통하여 배수가 용이하게 유도되고 압밀이 진행되어 전단강도가 증가하고 그에 따라 측방유동에 대한 저항력이 증가한 것으로 판단된다. 이와같은 지반변형 형태는 그림 6(b)의 무보강지반 변형도에 비하여 옹벽설치하부 지반에서 수평변위가 현저히 적게 나타나고 있는 것과 비교될 수 있다. 그림 6(c)를 보면 옹벽배면의 PBD설치구간과 SCP설치구간에서는 뒷채움성도재하 하중으로 인하여 연직압밀침하가 발생하였음을 알 수 있고 옹벽배면 SCP구간에서 수평변위 발생효과가 옹벽하부의 구간에 전달되어 옹벽의 수평변위가 발생하였음을 알 수 있다. 그림 6(a)의 무보강 실험조건인 지반변형에서는 옹벽배면의 수평변위가 옹벽설치 하부구간의 수평변위를 유발하고 있음을 확연히 알 수 있는 반면에 본 실험조건에서는 수평변위가 억제되어 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로, SCP보강이 교대의 측방유동에 대한 저항력을 증진시켰을 것으로 예상된다.

3.6 최종함수비 분포 측정결과

그림 7은 실험이 종료된 후에 모형토조를 해체하여 시료를 깊이별로 10층에 대하여 옹벽전면부, 옹벽하부, 배면부에 대하여 측정된 최종함수비를 나타낸 것이다. 무보강조건인 함수비측정결과 구간에 따라 평균 58%~59%정도의 함수비가 측정되었으며, 함수비분포는 그림 7(a)에서 볼 수 있듯이 세지점에 대하여 유사한 분포를 나타내고 있으며 하부로 갈수록 함수비가 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이와같은 결과를 그림 4(a)의 깊이에

따른 콘저항치의 변화와 일관성 있음을 알 수 있다. PBD보강 실험조건인 경우 원지반, 옹벽하부, PBD타설부로 나누어 함수비를 측정하였는데 연직

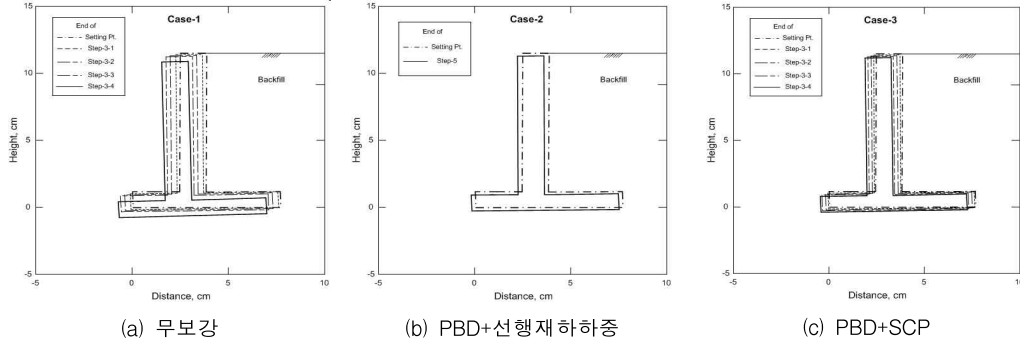


그림 5 교대변위 결과

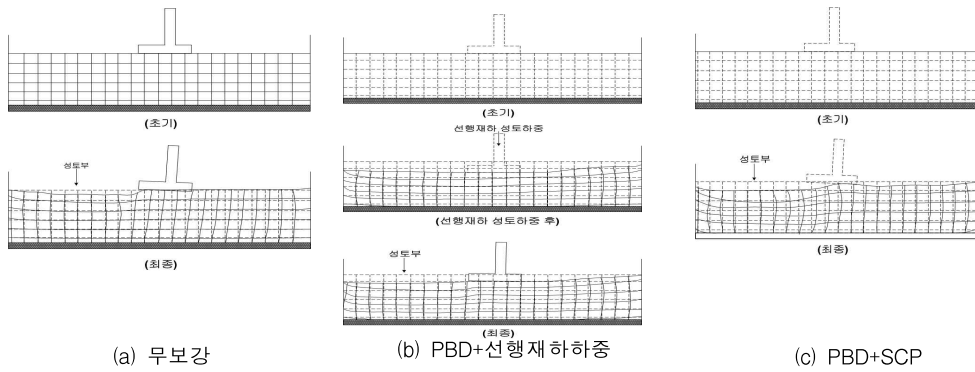


그림 6 지반변형 형상

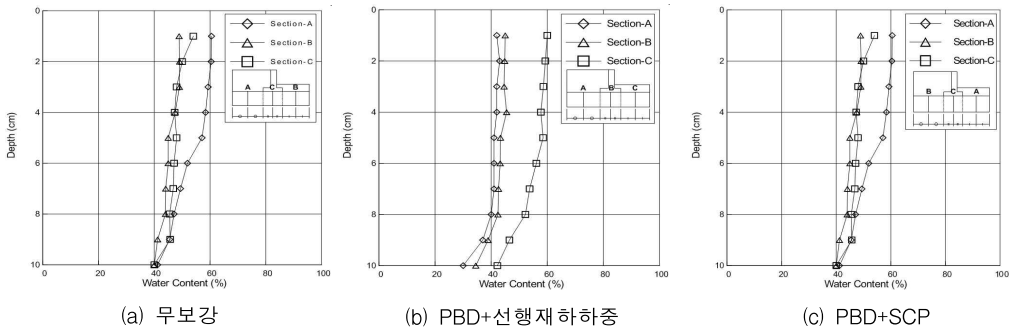


그림 7 함수비 분포

함수비 측정결과 옹벽전면지점(Section-C) 평균 54%이고, PBD타설부(Section-A)는 평균 34%로 나타났으며, 옹벽하부(Section-B)는 평균 43%가 측정되었다. 연직배수제에 대한 효과를 확인하기 위해 PBD와 PBD사이의 수평함수비도 측정을 하였는데 그 결과 PBD에 근접할수록 함수비는 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 함수비분포는 그림 4(b)의 콘저항치 변화와 일관성있게 옹벽전면부보다 옹벽 배면지점에서 콘저항치는 증가하고 함수비는 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. PBD+SCP보강 실험조건인 경우는 원지반 (Section-A), PBD타설부 (Section-B), SCP타설부 (Section-C)에 대하여 측정하였다. 연직함수비 측정결과 PBD 타설부는 평균 47%로 나타났으며, SCP구간도 47%가 측정되었는데, 이것은 SCP도 PBD와 마찬가지로 배수효과가 발생되어서 함수비를 감소시켰다고 할 수 있다. 반면에 원지반은 55%로 무보강 실험조건과 유사한 함수비 분포를 나타내고 있다.

3.7 응력분담비

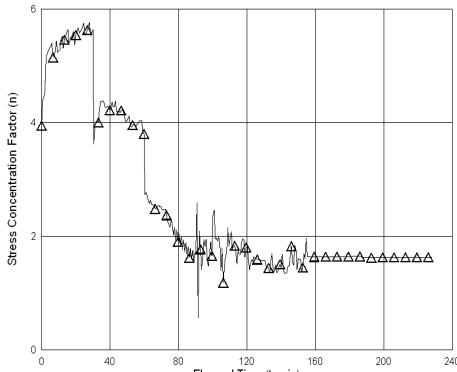


그림 8 응력분담비 곡선

그림 8은 모래말뚝과 점토지반에 전달된 응력분담비, ($n = \sigma_s / \sigma_c$)를 나타낸 것으로 성토단계에서 최대 5.79의 값을 지나 시간이 경과함에 따라 점토지반의 압밀이 진행되면서 그의 강성도가 증가함에 따라 응력분담비가 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다. 실험종료시의 응력분담비는 1.63 값에 접근하여 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 응력분담비의 변화는 점토지반의 압밀진행정도에 따라서 감소하는 경향이 있으며 대개 2~3정도 값에서 안정됨을 알 수 있으나 본 실험에서는 1.63의 값으로 비교적 낮은 값으로

측정된 것은 모래다짐말뚝에서 예상한 것 보다 다짐효과가 발현이 되지 못하여 그의 강성도가 낮게 나타난 것으로 추정될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 교대옹벽의 측방유동에 대한 안정성을 조사하기 위하여 말뚝기초로 타설된 교대옹벽에 대하여 하부연약지반을 무보강한 경우, PBD연직배수제를 설치 후 선행하중공법을 사용한 경우, PBD연직배수제와 모래다짐말뚝(SCP)으로 보강한 경우에 대하여 현장의 지반조건과 시공순서를 원심모형실험에서 재현하여 그의 거동을 모사하였다. 다양한 실험조건에 대한 원심모형실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)본 연구에 사용된 주문진표준사, 점토시료 등에 대한 물리적 특성을 파악한 결과 점토의 경우 비중 2.74, 액성한계 41.7~45.1%, 소성지수 21.5~23.3%으로 통일분류법에 의해 CL로 분류되며, 주문진표준사의 경우 균등계수 1.2의 SP로 분류되는 매우 균등한 입도분포를 지닌 것으로 나타났다.
- (2)무보강실험조건, 선행재하하중+PBD설치 실험조건, PBD+SCP설치 실험조건에 대한 원심모형실험결과, 옹벽뒤통채움재 성토하중에 의한 뒤통채움하부 점토지반의 연직침하량은 각각 1.73cm, 0.44cm, 1.85cm로 측정되어 선행재하하중+PBD설치조건이 유리함을 알 수 있었다.
- (3)교대말뚝의 수평변위 분석결과, 성토하중이 단계별로 증가되면서 수평변위가 증가함을 알 수 있었고 변위의 크기는 무보강의 경우가 가장 크게 측정되어 측방유동에 의한 교대옹벽의 불안정이 유발될 가능성이 있으며, 그 다음은 SCP+PBD보강한 경우로 SCP보강에 의한 수평저항력 증가와 PBD설치에 의한 배면성토하중에 의한 압밀진행에 따른 전단저항력의 증가에 의한 것으로 판단되고 선행재하하중+PBD설치조건은 가장 적은 수평변위가 측정되었으며, 그것은 선행재하하중에 의한 하부점토지반의 강도증진이 매우 효과적으로 작용한 것으로 판단된다.
- (4)PBD설치와 선행재하하중의 실험조건과 SCP+PBD설치의 실험조건의 침하양상, 콘저항치 결과, 하부점토지반의 변형에 대한 분석결과를 종합하였을때, 교대옹벽 배면성토하중에 의한 하부지반의 압밀발생을 전단강도 증진효과를 유발하여 교대말뚝기초의 측방유동에 대한 활동력을 감소시키는데 기여한 것으로 판단된다.
- (5)SCP보강 실험조건에서 모래다짐말뚝과 점토지반의 응력분담비는 성토재하 하중 초기에는

5.79의 값을 보이다 시간경과에 따라 압밀진행으로 응력분담비가 서서히 감소하여 1.63값에 수렴한 결과를 얻었다.

- (6) 실험종료후 SCP타설부와 PBD타설부, 원지반의 함수비 분포를 측정된 결과 원지반보다 SCP나 PBD설치구간에서 함수비가 감소하는 것으로 나타나 지중에 타설된 SCP, PBD에 의한 압밀배수효과를 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 서정주, 서동희, 정상섭, 김유석, “측방유동을 받는 교대말뚝기초의 거동분석 (I)”, *한국지반공학회논문집*, 제 19권, 1호, pp.5-19, 2000.
- [2] 서동희, 서정주, 장범수, 정상섭, “3차원해석에 의한 교대말뚝기초의 측방유동 발생메카니즘 분석”, *한국지반공학회논문집*, 제 17권, 2호, pp.85-93, 2001.
- [3] 홍원표, 권오현, 한중근, 조성환, “연약지반상 교대의 측방이동에 관한 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제 10권, 4호, pp.53-66, 1994.
- [4] 서정주, “원심모형 실험을 통한 측방유동을 받는 교대말뚝기초의 거동분석”, *연세대학교 토목공학과 석사학위 논문*, 2002.
- [5] 안종필, 홍원표, “측방유동을 받는 연약지반의 변형거동에 관한 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제10권, 2호, pp.25-41, 1994.
- [6] 최남선, “연약지반상 성토체에 근접한 교각의 측방이동에 관한 연구”, *전북대학교 토목공학과 석사학위논문*, 2003.
- [7] 홍원표, 송영석, 신도순, 손규만, “측방유동 연약지반상 교대의 안정성”, *한국지반공학회논문집*, 제 17권, 4호, pp.199-208, 2001.
- [8] 김유신, “연약지반상 교대의 측방유동에 관한 안정성 검토”, *조선대학교 토목공학과 석사학위논문*, 2001.
- [9] Tshebotarioff, G.P., “Lateral pressure of clayey soils on structures, Proc.”, 8th ICSMF, Specialty Session 5, Moscow, Vol.4.3, 1973.
- [10] Peck, R.B., Hanson, W.E. & Thornburn, T.H., “Foundation Engineering” John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [11] Brown, D.A., and Shie, C.F., “Some numerical experiments with a three dimensional finite element model of a laterally loaded pile” *Technical Note, Computers and Geotechnics*, Vol. 12, pp. 149-162, 1991.
- [12] Federal Highway Administration., “Design and Construction of Driven Pile Foundation.” FHWA-HI-96-033, National Highway Institute, 1996.
- [13] Stewart, D.P., Jewell, R.J., and Randolph, M.F., “Design of piled bridge abutments on soft clay for loading from lateral soil movements”, *Geotechnique*, Vol. 44, No. 2, pp.277-296, 1994.
- [14] Matsui, T., Hong, W.P. & Ito, T., “Earth pressures on piles in arrow due to lateral soil movement”, *Soil and Foundations*, Vol.22, No.2, pp.71-81, 1982.
- [15] De Beer, E. & Wallays, M., “Forces induced in piles by unsymmetrical surcharges on the soils around the piles”, 5th ECSMF, Madrid, pp.325-332, 1972.
- [16] Poulos, H.G., “Analysis of piles in soils undergoing lateral movement”, *JASCE* Vol. 99, No.SM5, pp.391-406, 1973.
- [17] Oteo, C. G., “Horizontal loaded piles, deformation influence”, 9th ICSMF, Specialty Session 10, Tokyo, pp. 101-106, 1977.
- [18] Leroueil, S., Magnan, J.P., Tavenas, F., “Embankments on soft clays”, Ellis Horwood, pp.147-231, 1990.
- [19] Poulos, H.G., “Behavior of laterally loaded piles : I-Single Piles”, *ASCE*, Vol. 97, No. SM5, pp.771-731, 1971.
- [20] Chen, L.T., and Poulos, H.G., “Pile subjected to lateral soil movements”, *J. of the Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, *ASCE*, Vol.123, No.9, pp.802-811, 1997.