

## 경사지반에 위치한 교대기초의 원심모델링

### Centrifuge Modelling of Bridge Abutment Foundation on the Sloped Ground

유 남 재\* 전 상 현\*\* 홍 영 길\*\*\*  
Yoo, Nam-Jae Jun, Sang-Hyun Hong, Young-Kil

#### Abstract

This paper is the research result about centrifuge model experiments of investigating the behavior of bridge abutment on the sloped ground.

Ground condition of the studied site was the bridge abutment with pile foundation adjacent to the slope. The pile foundations was supported on the soft rocks covered with the embankment. Evaluating the behavior of such a complicate ground and structure conditions was not easy so that the centrifuge modelling was performed to find the overall behavior of them. Layout of centrifuge model experiment was simplified to simulate easily the actual behavior of very complicate site condition. Construction process in field such as ground excavation for footing foundation, installation of piles, placement of footing and bridge abutment, backfilling and surcharge loading eas duplicated in the centrifuge model experiment. Consequently, the stability of the piled bridge abutment adjacent to the slope of embankment was evaluated throughout centrifuge modelling.

키워드 : 원심모델링, 교대기초, 안정성 검토

Keywords : Centrifuge modelling, Bridge abutment foundation, Stability evaluation

#### 1. 서론

우리나라는 지속적인 물동량의 확대와 교통량의 급증으로 인하여 지속적인 철도 및 도로의 건설이 진행되고 있다. 신규 철도 및 도로 공사 뿐만 아니라 기존 철도·도로의 확장도 많은 현장에서 이루어지고 있다. 최근 철도 및 도로공사는 경제성, 안정성 등을 목적으로 직선화된 노선을 채택하고 있는 경우가 많으며, 이로 인하여 기존에는 시공이 어려웠던 산악지역이나 연약지반, 경사지 등의 특이한 구간에 대하여도 설계와 시공이 이루어

지고 있다.

이와 같이 특이한 구간에 대한 설계와 시공으로 인하여 기존의 검토방법으로는 지반 및 지반구조물에 대한 거동을 만족스럽게 분석하지 못하는 경우가 발생하고 있다. 특이구간에 대한 거동분석은 모형시험과 지반변위 수치해석을 이용하여 해석하는 것이 일반적으로 적용되고 있다. ((Ko, 1988)

본 연구에서는 특이구간으로 매립층이 경사지반에 형성되어 있는 교대기초를 대상으로 원심모형 실험을 수행하고 결과를 분석하였다.

연구대상 구조물의 중요한 거동을 일차적으로 파악 할 수 있도록 하기 위하여 모형시험에 수월하게 적용하고 시공과정을 최대한 모사할 수 있는 기법을 사용하여 원심모형시험을 수행하였다. 원심모형시험은 모형단면을 고속으로 회전, 원심력에 의하여 중력가속도를 일정한 값으로 증가시킴으로

\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 강원대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 한림성심대학교 토목과 교수, 공학박사

써 흙의 유효응력수준이 현장(Prototype)지반과 유사하도록 구현할 수 있는 시험방법이다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 원심모형시험

#### 2.1.1 기본원리

원심모형시험의 기본원리는 축소된 모형을 인위적으로 증가시킨 자중효과로 상쇄시킴으로써 힘의 평형관계를 유지하는데 있다. 그림 1과 같이 2차원 평면변형상태에서 임의의 요소에 작용하는 힘의 평형식은 식 (2.1)과 같다.

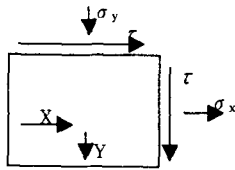


그림 1. 힘의 평형상태

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + Y = 0 \quad (2.1)$$

여기서, X, Y는 X, Y방향의 자중이다.

이와 같은 평형식에서 원심모형시험에서는 1/N의 축소된 모형을 사용하고 흙의 자중을 N배 가속시킴으로서 평형관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial (x/N)} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial (y/N)} + N \cdot X = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial (x/N)} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial (y/N)} + N \cdot Y = 0 \quad (2.3)$$

위와 같은 관계식에서 N값은 서로 상쇄되어 일반적인 힘의 평형방정식과 동일하게 된다. 따라서, 원심모형시험에서는 축소된 모형으로 흙의 자중을 인위적으로 증가시키어 현장 원형구조물의 초기 응력 상태를 재현시키고 어떠한 형태의 경계 조건에서 응력이 가하여져도 기본적인 힘의 평형 관계식을 만족시킴으로 원심모형시험에서 현장과 유사한 재질의 시료를 사용하여 시험을 수행하면 현장 구조물과 유사한 응력-변형 거동을 원심모형 시험에서 재현시킬 수 있다(Schofield, 1988 ; Ko, 1988).

모형시험에서 원형구조물의 거동을 정확히 재현시키기 위하여 상사성(Similarity)이 만족되는 조건

에서 원형의 거동을 지배하는 요소가 모형시험에서 모사되어야 한다. 원형과 모형의 상사관계 및 축척관계는 차원해석(Dimensional analysis)이나 미분 방정식(Differential equations)을 사용하여 구할 수 있다. 차원해석은 어느 변수들에 의하여 표시되는 자연현상의 물리적 관계를 나타내는 방정식은 동차원이어야 한다는 차원의 동차성 원리(Principle of dimensional homogeneity)에 근거한다.

#### 2.1.2 강원대학교 원심모형시험기 제원

본 연구에 사용된 원심모형시험기의 용량은 20g · ton이며 시험가능 한 모형토조의 크기는 500×500×600 mm이고, 원심모형기의 중심축으로부터 Hinge까지의 거리가 1m, Swing Basket의 저면까지 거리는 1.35m이다. Slip Ring은 총 40개의 Channel이고 재하장치의 구동 및 Video Camera의 전원을 공급하는 Slip Ring을 분리 설치하였으며, 2개의 유압식 Slip Ring은 원심모형시험기의 하단에 설치하였다. 또한 Zoom기능과 위치조절기능을 갖춘 폐쇄회로(CCTV)와 35mm SLR Camera가 원심모형시험기의 중심 축 좌우에 설치되어 45°각도로 설치된 반사경을 통해 실험과정을 Monitoring 할 수 있으며, CCTV의 경우 Slip Ring을 통해 외부에 비치된 VTR과 TV와 연결되어 있어 실험과정을 녹화할 수 있다.

강원대학교 토목공학과 지반공학연구실에 위치한 원심모형시험기는 연약지반의 압밀거동에 관한 연구(강대수, 1977 ; 전동욱, 1997), 역T형옹벽의 거동특성(엄재경, 1996), 사면에 인접한 옹벽의 거동특성(이명욱, 1998), 모래다짐말뚝의 특성연구(김상진, 2002) 등 다양한 지반공학 거동특성 연구에 사용되어 왔다.

## 2.2 사면안정해석

연구대상지역과 같이 성토사면위에 교대를 설치하는 경우는 인위적인 절 · 성토에 의해 조성된 사면으로 일반적으로 유한사면안정 해석법으로 검토하게 된다. 그에 대한 이론적 내용은 다음과 같다.

사면안정해석방법은 현장의 지질상태, 기발생 활동면의 존재여부, 안전율의 정의, 단기 또는 장기안정여부(전응력해석 또는 유효응력해석), 간극수압 등을 고려해서 선정한다.

유한사면 안정해석에서 한계평형법은 부정정 문제로 나타나기 때문에 미지수의 수와 방정식 수의 차이를 보완할 수 있는 개수만큼의 가정을 도입하여야 한다. 일반적으로 수직응력이 흙의 두께에 따라 달라지고 토질 정수와 간극수압의 위치도 상이하므로, 파괴토체를 수개의 연직절편으로 분할하고 각 절편에 대한 평형을 고려하는 절편법을 주로 이용하게 된다.

대표적인 절편법인 Fellenius(1936) 방법은 Ordinary Method라고도 하며, 절편법 가운데 가장 간단한 방법이다. 이 방법에서는 절편의 양측에 작용하는 힘의 합을 영으로 하고, 그 힘이 절편의 저면에 평행한 것으로 가정한다. 또한 수직력은 절편의 저면에 수직인 방향의 합력만을 고려한다.

이 방법에 의해 산정된 안전율은 과소평가하는 경향이 있는데, 이 오차의 범위는 정해에 비해 5~20%가량 된다고 한다. Fellenius법은 비교적 간단한 계산이 가능하기 때문에 현재까지 사용되고 있다.

Bishop(1955)의 간편법은 절편간의 전단력이 동일한 것으로 가정한다. 전체 수직력은 각 절편바닥의 중앙에 작용하는 것으로 보며, 각 절편에 수직으로 작용하는 힘을 계산하여 결정한다. 이 방법도 정역학적으로 풀기 위해 설정한 가정이 있어 정해는 될 수 없지만, 결과로 나온 안전율은 거의 정해에 가깝다고 본다.

Janbu(1954, 1968)가 제안한 방법은 간편법과 정밀해법 두 가지로 나눌 수 있다. 간편법은 각 절편의 측면에 작용하는 전단력이 없다고 가정하는 대신 흙의 특성과 사면의 기하학적 조건에 따라 변하는 보정계수,  $f_0$ 를 도입하여 절편간의 전단력 영향을 고려해 준다. 정밀해법은 모멘트평형과 힘의 평형을 모두 고려할 수 있는 최초의 방법으로 수직방향과 절편 저면 방향의 힘의 평형과 절편저면의 중점에 대한 모멘트 평형을 고려함으로써 두 평형 조건을 만족시킨다.

Morgenstern & Price(1965)가 제안한 방법은 원호 및 비원호활동에 모두 적용이 가능한 해법으로 활동면에 따라 응력과 힘이 연속적으로 변한다고 가정하여 안전율을 산정하였다.

도표를 이용한 방법은 예비설계 단계에서 사용이 되고 있다. 최초의 도표는 Taylor(1937)에 마찰원 방법을 근거로 제안했고, Janbu(1968)제안한 안정도표는 상재하중, 지하수위, 인장균열 등의 영향까지도 고려할 수 있는 방법이다. 이 밖에 역해석을 이용한 방법 등이 사면의 안전율을 산정하기 위해 개발되어 있다.

최근에는 전술의 해석방법을 수용하는 많은 상용프로그램이 개발되었다. 대표적인 프로그램으로 SLOPE/W v.5.4이다. SLOPE/W은 Limit equilibrium methods include, Morgenstern-Price, GLE, Spencer, Bishop, Ordinary, Janbu, and more 등의 해석기법을 포함하고 있다. 그 특징으로 다양한 해석기법과 지반모델 기능을 포함하고 있으며, 확률 신뢰성 해석 기능을 제공하고, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W등의 계열프로그램과의 연계해석이 가능하다.

### 3. 시험방법

#### 3.1 시료 및 물리적 특성분석

시험에 사용된 시료의 물리적 특성을 분석하기 위하여 현장에서 운반된 시료를 사용하여 초기함수비를 측정후 균질하게 혼합한 다음 대표성이 있는 시료를 일부 채취하여 비중, 입도 등의 기본 물성시험을 실시하였다.

과일기초가 설치된 교대기초의 지반조건은 상부의 성토 매립층과 하부의 충적층 지반으로 구성되어 있고 과일기초는 충화암층에 관입되어 설치 예정이다. 따라서 현장에서 성토 매립층과 충적층 시료를 교란상태로 채취하여 기본물성 실험을 실시하였다. 시험결과 매립층 시료의 비중은 2.67~2.69의 범위로 평균 2.68이 나타났다. 충적층 시료의 비중은 2.68~2.70으로 분석되었다. 본 연구를 위해 사용한 채취시료는 액·소성한계를 구할 수 없는 비소성(Non-Plastic)흙이다.

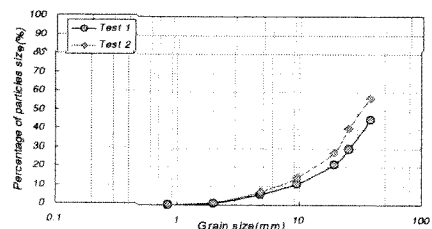
매립층에 대한 시험결과, 그림 2의 (a)와 같이 4.76mm이상의 자갈은 93.21~94.63%로 대부분을 구성하고 있으며, 나머지는 0.42mm이상의 모래로 구성되어 있다. 10% 통과량의 직경인 유효입경,  $D_{10}$ 은 6.6~8.3mm로 나타났으며,  $D_{30}$ 은 20.2~25.0mm로 분석되었다. 표준체의 가장 큰 크기인 8.1mm 이상으로 본 입도분석에서는 나타나지 않았다. 통일분류상 GP로 분석되었다.

충적층에 대한 시험결과, 그림 2의 (b)와 같이 4.76mm이상의 자갈은 포함되지 않고 있으며, 0.74~2.00mm이상의 모래로 구성되어 있다. 10% 통과량의 직경인 유효입경,  $D_{10}$ 은 0.23~0.26mm로 나타났으며,  $D_{30}$ 은 0.33~0.43mm로 분석되었고,  $D_{60}$ 은 5.05~5.68mm로 나타났다. 그러므로, 균등계수,  $C_u$ 는 21.8~21.9, 곡률계수,  $C_g$ 는 0.046~0.094로 분석되었다. 통일분류상 SP로 분석되었다.

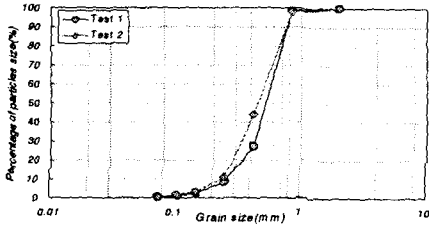
#### 3.2 원심모형시험

원심모형시험은 현장의 응력조건을 모사할 수 있는 좋은 시험방법이나 현장의 조건을 매우 세밀하게 구현하기에는 시험상 한계를 포함하고 있다.

현장 지반조건 및 구조물 제원에 근거한 상사성과 모형토조의 제원을 감안하여 본 연구에서는 해석단면을 1/2로 축소시킨 다음 50g의 중력수준을 적용하여 원심모형시험을 수행하였다.



(a) 매립층 시료



(b) 층적층 시료

그림 2. 입경가적곡선

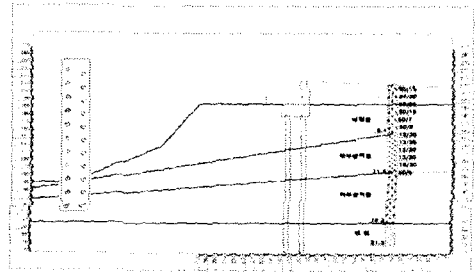


그림 4. 원심모형단면

### 3.2.1 연구대상 단면

연구대상 교대기초의 검토단면은 그림 3에 나타 내었다.

그림 3의 연구대상단면은 강원도 00공사구간에서 실제 설계된 교량의 교대이다. 본 연구에서는 그림 3과 같은 실제 설계단면에 대하여 적용함으로써 원심모형시험을 통하여 그의 지반공학적 거동을 관찰하여 구조적 안정성을 확보하였는지에 대하여 연구하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 연구대상 교대에 가장 근접하여 시추한 시추주상도에 의하면, 연암부에 말뚝의 선단이 근입되어 있으며, 그 상부로 토사층이 약 16.3m로 매립층 및 층적층으로 형성되어 있다. 교대의 말뚝은 직경  $D=508\text{mm}$ , 두께  $t=12\text{mm}$ 의 강관말뚝으로 적용되었다.

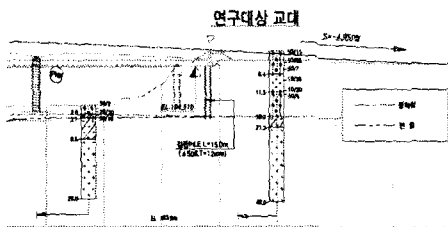


그림 3. 연구대상 구간의 단면도

원심모형시험을 위한 단면은 Centrifuge Model Box 규모의 한계상 단면을 1/2로 축소하여 그림 3.2와 같이 모사하였다. 기초로는 2열 11행의 총 22개의 말뚝을 모델링하였다. 토사층은 N값의 구분된 지층마다 N값의 큰 차이를 나타내므로 3개의 층으로 구분하였다. 기초하부는 연암층에 설치된 강관말뚝이 근입되는 것을 모델링하기 위하여 토조판에 고정도 플라스틱판을 고정시키고 홀(Hole)을 천공하여 말뚝이 근입되는 암반소켓을 모델링하였다.

### 3.2.2 모형지반조성

현장상태의 지반조건을 모사하기 위한 모형지반을 성형 및 강관말뚝의 모델링의 세부적인 절차와 지반특성은 다음과 같다.

① 대상 교대의 강관말뚝이 근입되는 연암층을 모사를 위하여 그림 4와 같이 MC 나이론 플라스틱판을 말뚝의 지지층으로 모델링하였다. MC 나이론 플라스틱판에 말뚝이 근입되는 위치에 구멍을 뚫고, 모형토조에 설치한 후 강봉을 이용하여 고정하였다.

② 대상 교대가 설치되는 지반은 하부층적층이 직경 2~10cm의 모래 섞인 자갈층으로 구성되어 있다. 이러한 크기로 구성되어 있는 현장 채취 자갈은 그 크기가 커서 모델링에 적합하지 않는다. 그러므로 본 연구에서는 이에 대한 상사성을 고려하여 자갈에 대하여 모형직경 0.4~2mm(=2~10cm/50g)의 흙을 현장채취시료로부터 표준체를 이용하여 분리한 후 사용하였다. 지반조성은 하부층적층으로 모사한 시료를 투입하여 지반을 조성하고 진동다짐을 통하여 현장 지반의 건조단위중량을 재현하였다.

③ 하부층적층 상부에 상부층적층과 매립층에 대한 모형지반을 그림 4와 같이 설치하였다. 경사면을 설치하고 하중과 진동으로 다짐을 실시하여 현장조건과 유사한 건조단위중량을 맞추었다. 지층사이에는 원심모형시험에서의 변위에 대한 사진관측을 위하여 지시점을 설치하였다. 지시점은 속이 빈 중공의 원형 금속봉을 가공, 도색처리하여 사용하였으며, 지반거동에 영향을 최소화하기 위해 길이를 5mm, 직경 3mm의 소형크기에 지시자의 단위중량을 흙의 비중과 유사하게 제작하였다.

④ 모형지반 설치 후 50g로 가속하여 초기용력을 발현시켰다. 가속전에 LVDT를 설치하여 지반의 침하를 관찰하면서 지반에 응력이 작용하여 안정화되는 시점을 관찰하였다.

### 3.2.3 말뚝의 조성

교대기초로 사용되는 D508mm의 강관말뚝을 모사하기 위하여 모형을 제작하였다. 508mm의 직경은 상사법칙을 고려하여 5mm의 직경의 황동관을 사용하였다.

현장조건에서의 강관말뚝 시공은 PRD로 계획되어 있으므로 이를 모사하기 위하여 타설틀을 만들어 수직을 유지하도록 하여 드릴의 회전력에 의해 타설되도록 하였다. 이 때 수직도 및 지반교란을 최소화하고, 구멍을 뚫은 MC 나일론 플라스틱판에 정확히 근입되도록 매우 느린 회전속도로 타설하였다.

### 3.2.4 배면매립 및 하중재하

말뚝 및 교대저판 설치 후 소정의 중력수준을 가하여 지반변위를 분석하였다. 이후 교대의 벽체와 배면매립 및 차랑하중 등의 상재하중을 작용하였다.

교대의 벽체는 교대저판과 같은 재질의 고강도 플라스틱을 사용하였으며, 미리 플라스틱용 접착제를 이용하여 저판과 벽체를 완전히 일치화하였다. 배면매립은 모형단면의 단위중량을 맞출 수 있도록 흙과 슬래그를 혼합하여 적용하였다. 상재하중은 1.5kPa의 하중분포에 대하여 상사성을 고려하여 납으로 제작한 블록으로 재하하였다.

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 원심모형시험 결과

원심모형시험에 의한 연구 대상 단면의 지반 및 말뚝, 교대 등의 변위거동 모사를 위해 원지반을 조성하고, 기초굴착·말뚝타설·기초판 설치 및 교대설치·배면매립·하중재하 등의 과정으로 시험을 수행하여 아래와 같이 지반거동을 분석하였다.

#### 4.1.1 모형 원지반 조성(STEP-1)

지반조성 후 원심모형시험에 의해 50g의 중력으로 가속 전 및 가속 후 모형을 나타내었다. 또한, 이를 판독하여 수치로 변환·보정하여 그림 5와 같이 수치화 모형으로 분석하였다.

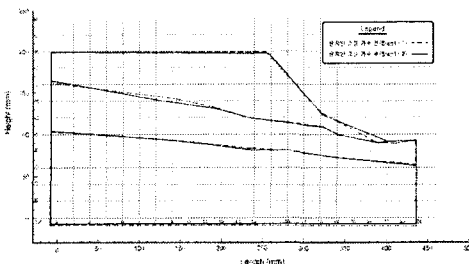


그림 5. 모형지반 설치에 대한 수치화 모형

#### 4.1.2 말뚝 및 교대저판 설치(STEP-2)

모형지반을 조성한 후 강관말뚝 및 교대설치후 50g의 중력수준으로 가속하여 원심모형시험을 실시한 결과 50g 중력수준 가속전과 가속후의 모형 단면을 나타낸다. 그림 6의 가속전·후를 수치화한 모형과 같이 지반의 큰 변화는 발생하지 않았다.

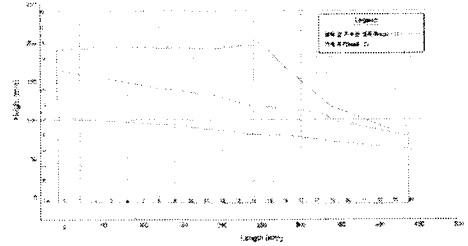


그림 6. 말뚝 및 교대저판 설치에 대한 수치화 모형

#### 4.1.3 배면매립 및 하중재하(STEP-3)

말뚝 및 교대저판 설치 후 교대벽체, 배면매립과 하중재하를 실시하고, 50g의 중력수준으로 가속하여 모형결과를 획득하였으며, 이를 수치화 모형으로 변화하여 그림 7에 나타내었다.

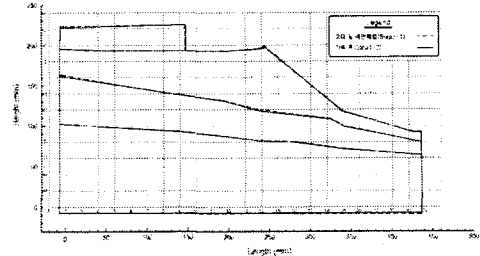


그림 7. 배면매립 후 가속 전·후의 수치화 모형 비교

배면매립 및 하중재하에 의한 수치화 모형과 비교하여 나타낸 그림 7에서 보는 바와 같이, 전반적으로 큰 침하(연직변위)나 수평변위는 나타나지 않았다. 가장 큰 연직변위는 배면매립층에서 약 1.0mm로 발생하였으며, 가장 큰 수평변위는 교대벽체에서 약 1.5mm로 나타났다. 상사법칙 및 축소모형을 고려할 때, 연직침하는 약 10cm(= 1.0mm × 50g ÷ 1/2축소)로 예상되며, 수평변위는 약 15cm(= 1.5mm × 50g ÷ 1/2축소)로 예상되었다.

#### 4.1.4 계측자료 분석

사진 판독에 의한 지반거동 분석의 한계를 극복하기 위하여, STEP-3의 마지막 단계에서 교대벽체에 연직 및 수평 LVDT를 설치하여 소정의 중력수준에서의 시간에 따른 침하량을 측정하였다.

설치한 변위계로부터 침하 및 수평변위를 분석한 결과를 상사성을 고려하여 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 보는 바와 같이 시간에 따라 침하량이 증가하다 약 165일 경과 후에는 수렴하는 것으로 나타났다. 최종 변위량은 연직방향의 경우 12.0mm로 분석되었으며, 수평방향의 경우 14.0mm로 분석되었다.

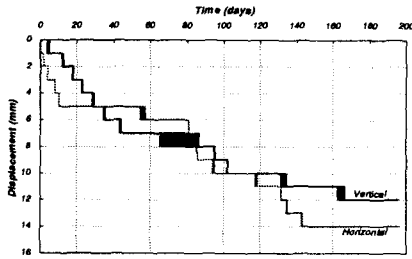


그림 8. 배면매립 및 상재하중에 의한 교대벽체의 변위분석

위와 같이 원심모형시험을 통하여 교대기초의 설치에 따른 지반변위 및 교대설치 후 배면 매립과 상재하중 재하에 의한 교대벽체의 수평 및 연직 변위 등을 분석할 수 있었다. 분석된 변위로부터 설계기준 또는 설계시 산정한 허용 변위 등과 비교함으로써 교대기초의 안정성을 원심모형시험을 통하여 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 경사지에 설치된 교대의 거동 검토를 위하여 원심모형시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 경사면에 인접한 교대의 지반거동 분석 및 안정성 평가를 위하여 지반 및 말뚝, 교대, 상재하중 등을 모형화하여 중력수준 50g의 가속조건으로 원심모형시험을 수행하였다.

2) 원심모형시험은 현장의 시공조건 재현을 위하여 원지반 조성, 말뚝타설 및 교대저판설치, 교대벽체, 배면 매립, 상재하중 재하 등 5개의 시공 단계로 구분하여 시험을 진행하여 현장조건을 모사할 수 있었다.

3) 원심모형시험에서 측정된 교대부의 연직변위와 수평변위에 대하여 상사성을 적용하여 수정한 값을 허용변위량과 비교 분석하여 교대의 안정성을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] 강대수(1997), “연약점토의 이차원 압밀에 관한 원심모형시험”, 공학석사 학위논문, 강원대학교 대학원
- [2] 김상진(2002), “저치환율 모래다짐말뚝의 원심모형시험”, 공학석사 학위논문, 강원대학교 대학원
- [3] 엄재경(1996), “상재하중하 역T형 옹벽의 활동거동에 관한 원심모형시험”, 공학석사 학위논문, 강원대학교 대학원
- [4] 이명욱(1998), “사면에 인접한 옹벽의 원심모형시험”, 공학석사 학위논문, 강원대학교 대학원
- [5] 전동욱(1997), “원심모형시험에 의한 연약점토의 자중압밀에 관한 연구”, 공학석사 학위논문, 강원대학교 대학원
- [6] 지반공학회, (1997), 지반공학 시리즈5 사면안정 구미서관 pp.78-101.
- [7] Bishop, A. W.,(1955), “The Use of the Ship Circle in the Stability Analysis of Slopes”, *Geotechnique*, 5(1), pp.7-17.
- [8] Fellenius, W. (1936), “Calculation of stability of Earth Dams.”, *Trans. 2nd Congress on Large Dams*, Vol. 4, pp.445
- [9] Janbu, N., (1954). “Stability Analysis of Slopes with Dimensionless Parameters.” *Harvard Soil Mechanics Series*. No. 46, p.811.
- [10] Janbu, A. W. (1968), “Slope Stability Computations.” AMFE, Report, The Technical University of Norway, Trondheim.
- [11] Ko, H.-Y., (1988), “Summery of the State-of-art in Centrifuge Model Testing”, *Centrifuge in Soil Mechanics*, Craig, James & Schofield(eds), Balkema, pp.11~18.
- [12] Morgenstern, N. R. and Price, V. E., (1965), “The analysis of General Slip Surfaces” *Geotechnique*, 15(1), pp.79-93.
- [13] Taylor, D. W. (1937), “Stability of Earth Slopes”, *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, Vol.24, pp.197-246.
- [14] Schofield, A. N. (1980), “An introduction to centrifuge modelling”, *Centrifuge in Soil Mechanics*, Craig, James & Schofield(eds), Balkema, pp.1~9.