수평하중을 받는 콘크리트말뚝의 모형실험
Model Tests of Concrete Pile under Lateral Loads

박종운[1], Joung-Un Park, 김진복[2], Jin-Bok Kim, 진홍민[3], Hong-Min Jin, 권오균[4], Oh-Kyun Kwon

[1] 계명대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ
[2] 계명대학교 토목공학과 박사, Ph. D., Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.
[3] 계명대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.
[4] 계명대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng. Keimyung Univ.

SYNOPSIS : The purpose of this study is to analyze the behavior of the concrete pile under the horizontal loads by the model tests in laboratory. The rock ground was modeled by the concrete of about 30MPa, and a model pile was made of some mortar with the capacity of 24MPa. The diameter(D) and length(L) of a model pile was each 1200mm and 1800mm. The embedment depth into the concrete block was varied with 1.0D, 1.5D, and 2.0D in the model tests. The results of model tests showed that the lateral resistance of a pile with the embedment depth of 2.0D was more large than other cases, and the lateral displacement of yielding was similar.

Key words : Concrete Pile, Lateral Loads, Lateral Yielding Capacity, Model Test

1. 서 론

말뚝 기초는 강재나 콘크리트 등으로 상부 구조물의 하중을 하부의 기반암 또는 주변 지반에 전달하여 구조물의 안정성을 확보하는 깊은 기초의 한 종류이다. 국가 경제의 발달로 도심지역의 산업화, 광역화 및 조밀화 등으로 인하여 각종 구조물들은 형태 및 구성에 있어 한층 더 복잡한 양상을 나타내고 있다. 이로 인해 기초 구조물의 설계와 시공은 과거에 비하여 보다 많은 제약조건을 포함하게 되었으며, 건축물의 대형화, 초 고층화 등의 경향이 두드러지며, 장대교량 등의 기초로 대구경 말뚝의 사용이 급격하게 증가하고 있다. 특히 해상 교량의 기초 말뚝으로는 대구경 현장타설말뚝과 강관말뚝이 사용되어 질 수 있는데, 국내의 대부분의 교량기초의 경우 희생강관내에 레미콘을 현장타설하여 시공한 대구경 현장타설 철근콘크리트 말뚝을 사용하고 있다. 말뚝기초 상부의 구조물이 토압, 풍압, 파력 등 횡방향 수평하중을 받게 되면 말뚝 두부에서는 과다한 수평변위와 모멘트가 동시에 발생하게 되어 파괴에 도달하게 된다. 그러므로 실제 말뚝 설계시 수평하중에 의한 말뚝 거동 특성을 파악하는 것이 매우 중요하지만, 국내의 말뚝에 대한 연구들은 대부분 연직하중에 대한 말뚝의 거동특성에 대한 연구가 많으며, 수평하중에 대한 거동특성은 부족한 편이다. 따라서 본 연구에서는 모형실험을 통하여 말뚝이 암반을 형상화한 콘크리트 블록에 근입되는 콘크리트말뚝에 대하여 수평하중에 대한 거동특성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 개요

말뚝 기초의 지지력에 대한 현장실험과 이론적 평가는 주로 압축 하중에 대하여 수행된 것이 대부분이다. 수평력을 받는 말뚝은 말뚝과 지반 중 어느 것이 움직이는 주체인가에 따라 주동말뚝과 수동말뚝

으로 분류된다. 주동말뚝은 말뚝 두부에 수평력이 재하되어 말뚝이 변형함에 따라 말뚝주변지반이 저항하게 되고 하중이 지반에 전달된다. 즉, 먼저 움직이는 주체가 말뚝이 되고, 말뚝의 변위가 주변지반의 변형을 일으키는 경우에는 주동말뚝으로 정의하여 해석한다.

수동말뚝은 주변지반에서의 성토나 절토 등으로 인하여 말뚝주변 지반이 먼저 변형을 일으켜 그 결과로써 말뚝에 측방토압이 작용하는 경우이다. 즉, 말뚝주변 지반이 먼저 움직이는 주체가 되어 지반이 말뚝에 하중을 가하는 경우에는 수동말뚝이라 정의하여 해석을 한다. 따라서 사용목적에 맞게 말뚝을 안전하고 경제적으로 설계하려면 말뚝의 움직임 및 말뚝과 지반 사이의 상호작용에 의한 하중 메카니즘을 명백하게 이해하여야 한다. 수평하중을 받는 말뚝의 설계는 두 가지 측면에 의하여 영향을 받는다. 첫째는 말뚝의 허용변위량(y_{all})이고, 둘째는 말뚝의 허용휨모멘트($M_{\max}$)이다. 따라서, 말뚝의 수평방향 허용지지력은 두 가지 기준을 동시에 만족하도록 결정해야 한다.

2.2 말뚝기초의 수평저항력 산정

Broms(1964)는 수평력을 받는 말뚝 지반계의 파괴형태를 고찰하여 말뚝의 휨강석과 근입길이 및 지반강성에 의하여 말뚝을 분류하였고, 지반을 점성토와 사질토로 나누어 말뚝의 극한 수평저항력을 구하는 방법을 제안하였다. 지반에 따른 말뚝의 길고 짧음의 판별은 표 1과 같다. 이 표에서 L은 말뚝의 근입길이(cm)이며, β와 η은 각각 식(1) 및 식(2)와 같다.

표 1. 말뚝의 판별(Broms, 1964)

	점 성 토	사 질 토
짧 은 말 뚝	βL<2.25	ηL<2.0
중 간 말 뚝	-	2.0≦ηL≦4.0
긴 말 뚝	βL>2.25	ηL≦4.0

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4EI}} \qquad (1)$$

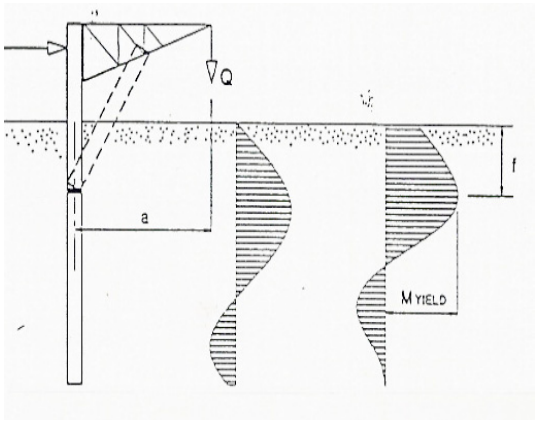
$$\eta = \sqrt[5]{\frac{n_h}{EI}} \qquad (2)$$

표 1은 점성토와 사질토 지반에서 장·단 말뚝을 나타낸 것으로 말뚝과 지반에 대하여 다음의 가정을 한다.

① 짧은 말뚝, 중간 말뚝에서는 말뚝길이 전역에 걸쳐서 파괴한다.

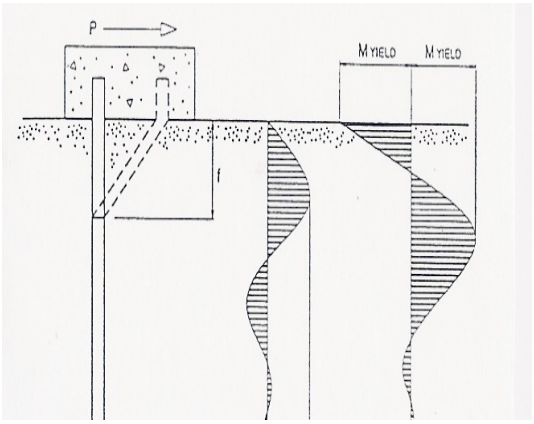
② 긴 말뚝에서는 지중부의 말뚝체에 소성힌지가 발생하고, 상부의 지반은 전역에 걸쳐서 소성화 한다.

그림 1과 그림 2는 사질토 지반에서 두부 자유인 장말뚝과 두부고정인 장말뚝의 말뚝과 지반의 파괴형태를 보이고 있다. Broms(1964)는 두부가 자유인 장말뚝에서 최대모멘트지점인 f에서 소성힌지가 발생한다고 가정하였으며, 두부가 고장된 장말뚝의 거동은 2개의소성힌지가 발생되는 것을 알 수 있다. 지표면 아래 f 깊이와 최대 부의 모멘트가 작용하는 말뚝두부 바닥면에서 말뚝단면의 항복응력에 도달할 때 소성힌지가 발생한다.



(a)말뚝변위 (b)지반변위 (c)휨모멘트

그림 1. 두부자유 장말뚝의 거동(Broms,1964)



(a)말뚝변위 (b)지반변위 (c)휨모멘트

그림 2. 두부구속 장말뚝의 거동(Broms,1964)

Prakash(1962)는 말뚝두부에 작용하는 횡방향 하중에 의해 말뚝 몸체에 작용하는 최대 횡방향 토압은 Rankine 토압이론으로 구한 값의 2~3배에 이른다고 밝혔으며, 이를 근거로 Broms(1964)는 파괴 시 발생하는 토압은 그림 3과 같이 Rankine의 수동토압의 3배와 같고 횡방향토압은 말뚝의 모양과 무관하다고 가정하였다.

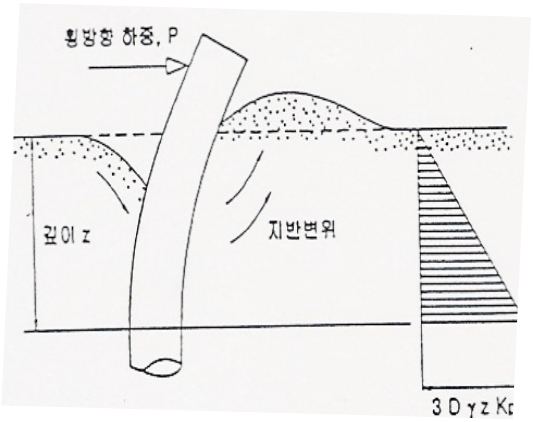


그림 3. 횡방향 하중을 받는말뚝의 변위 및 토압분포(Broms, 1964)

3. 모형실험 장치 및 방법

3.1 모형지반 및 모형말뚝

본 연구에서는 암반지반에 근입된 수평하중을 받는 콘크리트말뚝의 거동특성을 파악하기 위하여 실내 모형실험을 수행하였다. 본 연구에서 지반구성은 암반지반을 모사한 1200mm×1500mm×500mm(가로×세로×높이)의 강도가 약 30Mpa 인 콘크리트 지반위에 1200mm×1500mm×1800mm(가로×세로×높이)크기의 모형 토조를 설치하여 느슨한 모래지반으로 조성되었다. 모래지반을 조성하기전에 콘크리트지반에 말뚝 직경의 1.0, 1.5, 2.0배의 근입깊이를 가지도록 천공하여 말뚝을 설치하고 그라우팅을 실시한 후에 모래지반을 조성하였다. 실험에 사용된 모형지반은 경상북도 성주지역의 낙동강에서 채취한 모래로 10체를 통과한 시료만을 채취하여 건조시킨 모래로 상대밀도(D_r) 약 27%, 내부마찰각(ϕ) 31°, γ_d=14.6kN으로 통일분류법상 SP로 분류된다. 모형말뚝은 그림 4와 같이 강도가 약 24Mpa 인 모르타르를 사용하여 철근비1.5%로 적용하여 직경(D)=120mm, 길이(L)=1800mm로 제작하였다.

그림 4. 모형말뚝 제작과정

3.2 모형실험 순서

모형 실험은 동일한 모형말뚝이 콘크리트 블록에 근입 되는 깊이를 각각 1.0D, 1.5D, 2.0D로 다르게 천공하여 말뚝을 근입하고 그라우팅을 실시하여 말뚝을 설치하였다. 그라우팅 부분이 완전히 양생되고 나서 모래 지반을 조성하고 일정시간동안 지반을 안정화 시킨 후 수평하중을 재하하였다. 하중재하 방식은 표 2와 같이 한방향 Multy 사이클 방식으로 말뚝의 두부에 수평하중을 재하 하여 하중에 따른 변위를 측정하였다. 수평하중을 받는 말뚝의 변위는 그림 5와 같이 와이어 변위계와 LVDT를 설치하여 측정하였다. 와이어 변위계는 모래지반에 매설되어있는 말뚝의 변위양상을 측정하기 위하여 일정한 간격으로 지반 속에 가는 강선을 연결하여 설치하였다. 모형실험을 수행하는 동안 재하하중과 말뚝의 수평변위는 테이터 로거(TDS-602)에 자동으로 기록 저장된다. 모형실험의 전경은 그림 6에 나타나 있다.

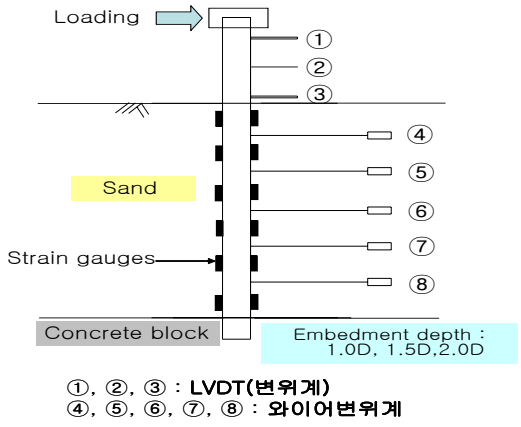


그림 5. 실험모형도 및 계측기 설치

그림 6. 모형실험 전경

표 2. 하중재하방식(근입깊이 2.0D)

하중장치		실린더 유압잭을 이용한 수평하중 이용					
하중 단계수		14 단계					
Cycle 수		7 Cycle					
재하단계 및 계측시간							
1 Cycle	하중 (N)	0	294	588	294	0	
	계측시간 (min)	10	10	10	10	10	
2 Cycle	하중 (N)	588	882	1176	588	0	
	계측시간 (min)	10	10	10	10	10	10
3 Cycle	하중 (N)	1176	1470	1764	1176	588	0
	계측시간 (min)	10	10	10	10	10	10
4 Cycle	하중 (N)	1764	2058	2352	1176	588	0
	계측시간 (min)	10	10	10	10	10	10
5 Cycle	하중 (N)	2352	2646	2940	1470	588	0
	계측시간 (min)	10	10	10	10	10	10
6 Cycle	하중 (N)	2940	3234	3528	1764	882	0
	계측시간 (min)	10	10	10	10	10	10
7 Cycle	하중 (N)	3528	3822	4116	1960	882	0
	계측시간 (min)	10	10	10	10	10	10

4. 모형실험 분석

본 연구에서는 암반을 형상화한 콘크리트 블록에 근입된 콘크리트 말뚝의 수평하중에 대한 말뚝의 수평 거동 특성을 연구하기 위하여 모형실험을 실시하였다. 모형실험의 조건은 콘크리트말뚝이 근입되는 깊이를 각각 1.0D(=12cm), 1.5D(=18cm), 2.0D(=24cm)로 다르게 하여 구속되지 않은 말뚝두부에 수평하중을 재하하여 하중 증가에 따른 말뚝의 수평하중-수평변위 관계를 분석하였으며, 모래지반속의 말뚝의 변화양상을 확인하기위하여 가는 강선을 이용하여 와이어 변위계를 설치하여 지반속의 말뚝의 위치별 변위형태를 파악하였다.

4.1 수평하중에 따른 하중-변위 곡선

근입 깊이가 1.0D인 콘크리트말뚝에 대한 수평하중재하시험은 하중단계를 10단계로 하여 6cycle의 하중재하방식으로 최대하중을 1.96kN까지 재하 하였고, 근입 깊이가 1.5D인 경우는 10단계의 하중을 5cycle의 하중재하방식으로 2.94kN까지 재하 하였으며, 근입 깊이가 2.0D인 경우는 14단계의 하중을 7cycle의 하중재하방식으로 4.116kN까지 재하 하였다. 각 하중단계별로 지속시간은 10분을 유지하고 다음단계 하중을 재하 하였다. 수평하중재하시험 결과 근입깊이 1.0D 조건에서 항복하중이 1.60kN이고 이때의 변위는 37mm로 나타났고, 근입깊이 1.5D조건에서 항복하중이 1.76kN이고 변위가 33mm로 나타났으며, 근입깊이 2.0D 조건에서는 항복하중이 2.02kN이고 그 때의 변위가 34mm로 다른 조건과 비교하여 항복하중 시 변위는 비슷하지만 가장 큰 항복하중을 지지하는 것으로 나타났다. 이에 대한 결과를 그림 7~그림 9에 나타내었다. 또한 모래지반 속에서 말뚝의 변위 양상은 하부에서 상부로 서서히 변위가 증가하는 양상을 보이고 있으며, 하중이 증가 할수록 지표면 보다 말뚝하부에서 말뚝길이의 0.7H 지점에서 변위가 가장 크게 나타났다. 수평하중에 의한 말뚝의 위치별 변화양상을 그림 10에 나타내었다.

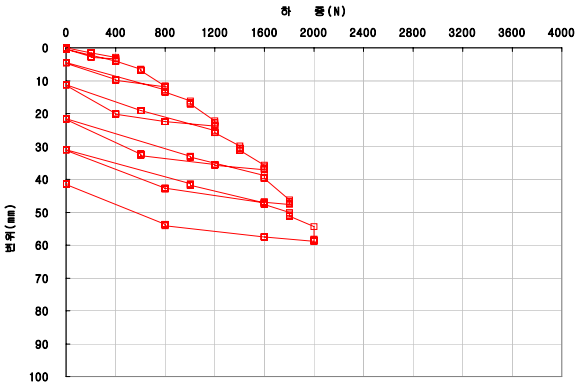


그림 7. 근입깊이 1.0D 조건의 하중-변위

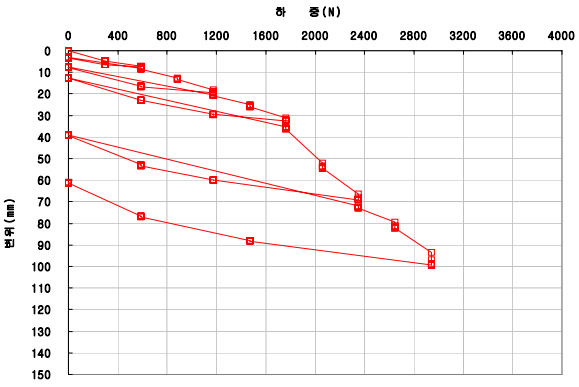


그림 8. 근입깊이 1.5D 조건의 하중-변위

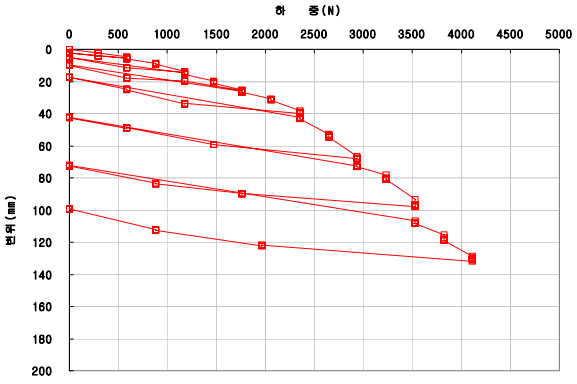
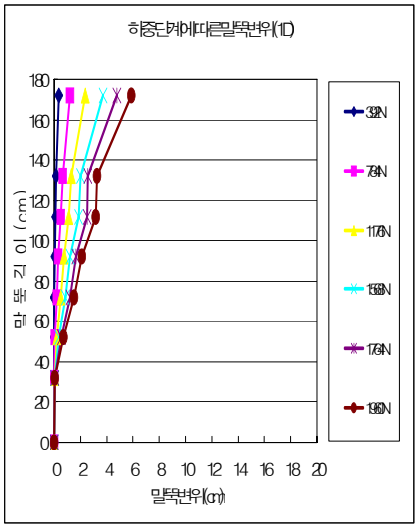
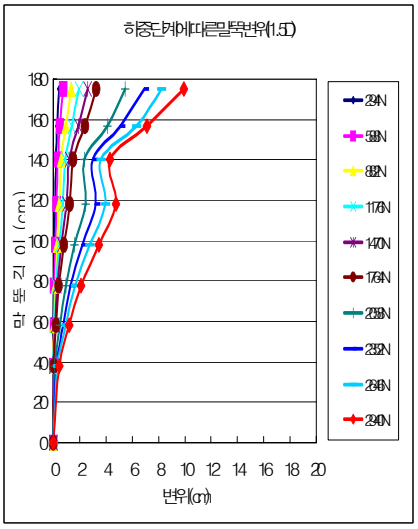


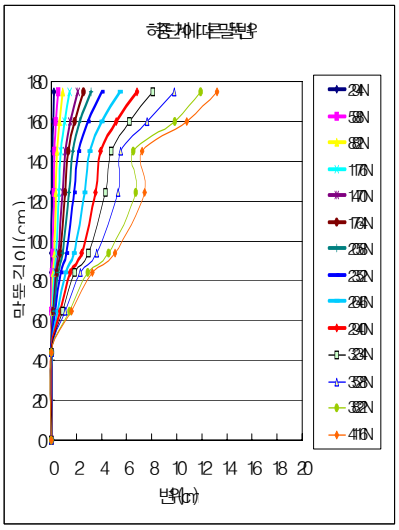
그림 9. 근입깊이 2.0D 조건의 하중-변위



(a) 근입깊이 1D



(b) 근입깊이 1.5D



(c) 근입깊이 2D

그림 10. 말뚝의 위치별 변위

5. 결 론

본 연구는 암반을 형상화한 콘크리트 지반에 근입된 콘크리트 말뚝에 대하여 실내모형실험을 수행하여 수평하중에 대한 말뚝의 수평 거동 특성을 연구하였다. 모형실험에서는 말뚝이 콘크리트 블록에 근입되는 깊이를 3종류(1.0D, 1.5D, 2.0D)에 대하여 실시하였으며, 구속되지 않은 말뚝두부에 수평하중을 재하하여 하중 증가에 따른 말뚝의 수평하중-수평변위 관계와 지반 속에서의 위치별 말뚝의 변위형태를 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모형실험 결과, 근입깊이 1D 조건에서 말뚝의 수평항복하중이 1.6kN이고 그 때의 변위는 37mm로 나타났고, 1.5D조건에서는 항복하중이 1.76kN이고 변위가 33mm로 나타났으며, 2D조건에서는 항복하중이 2.02kN이고 변위가 34mm로 나타났다. 근입깊이 3종류에 대한 모형실험에서 항복하중 시 변위는 비슷하게 나타났지만, 근입깊이 2D 조건이 가장 큰 수평 항복하중을 지지하는 것으로 나타났다.

2. 모래지반 속에서 말뚝의 변위 양상은 하부에서 상부로 서서히 변위가 증가하는 양상을 보이고 있으며, 하중이 증가 할수록 지표면 보다 말뚝하부에서 말뚝길이의 0.7H 지점에서 변위가 가장 크게 나타났다.

참고문헌

1. 김준석 (1998), **말뚝기초의 설계법과 해설**, 과학기술.
2. 조천환. (2007). **매입말뚝공법**. 이엔지・북.
3. 한국지반공학회 (2002), **깊은기초**, 구미서관.
4. 홍원표. (1984). 수평력을 받는 말뚝. **대한토목학회지**, 31(5), 32-36.
5. Bowles, J. E. (1978). Engineering properties of soil and their measurements (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
6. Broms, B. B. (1964). Lateral resistance of piles in cohesive soils. ASCE, 90(2), 27-63.
7. Broms, B. B. (1965). Design of laterally load piles. ASCE, 91(3), 79-99.
8. Broms, B. B. (1965). Piles in cohesionless soil subject to oblique pull. ASCE, 91(4), 199-207.