

모형실험을 통한 횡하중을 받는 말뚝의 준설깊이 산정

An Dredging Depth Calculation of a Pile Under Lateral Loading Based on Model Test

유찬호¹⁾, Chan-Ho Yoo, 이중재²⁾, Jung-Jae Lee, 김승욱³⁾, Seung-Wook Kim,
정종민⁴⁾, Jong-Min Chung, 김홍택⁵⁾, Hong-Taek Kim

¹⁾ (주) KER 대표이사, President, KER. Co., Ltd.

²⁾ 홍익대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, Hongik Univ.

³⁾ 한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원, Researcher, Rural Research Institute, K.R.C.

⁴⁾ 홍익대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, Hongik Univ.

⁵⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng, Hongik Univ.

SYNOPSIS : The safety of pile foundation is getting declined when the pile foundation acting on lateral load is exposed by dredging. So appropriate reinforcement is needed for stability secure. Thus, in this study, the stability variation and reinforcement range caused by dredging is estimated on the basis of down scale test. The scale effect is determined by real scale numerical analysis. the behavior of pile by dredging stages is estimated by load control type. The credibility is verified through the comparison between down scale model test and numerical analysis.

Keywords : Down scale model test, Dredging stages, Numerical analysis, Pile foundation

1. 서 론

지표면 아래 지지층이 하부 깊숙이 존재하는 경우에는 상부구조물의 하중을 안전하게 지지하기 어려우므로 깊은기초인 말뚝기초 활용 증대가 일반적인 설계가 진행되고 있는 실정이다. 또한, 예로부터 각종 구조물 기초에 말뚝시공시 안정성 확보가 용이하여 널리 이용하여 오고 있다. 도심지역의 산업화 공업화로 인한 부지조밀화 등의 영향 때문에 각종 구조물은 보다 더 복잡한 구성 및 형식의 양상을 보이고 있으며, 예전에 비해 기초 구조물의 설계 및 시공은 많은 제약요건을 가지게 되었고, 보다 정확하고 신뢰성이 높은 설계를 요구하게 되었다.

최근 준설로 인한 말뚝기초 노출시 횡하중을 받는 말뚝기초는 매우 취약하여 안정성 확보 여부 및 적정한 보강범위를 결정하여야 하는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 실제 현장여건을 최대한 반영하여 실내에서 현장조건과 동일하게 모형실험을 수행하여 준설시 말뚝기초 노출로 인한 안정성 확인 및 보강범위를 평가하였다. 또한 실제단면을 이용하여 수치해석으로 영향범위를 산정하여 상사율을 결정하여 모형실험을 수행하였으며, 횡하중 재하시 하중제어 방식으로 준설단계별 말뚝의 거동을 분석하였다. 아울러 수치해석과 모형실험을 병행하여 비교·분석을 통한 신뢰성을 검증하여 보강범위를 산정하였다.

2. 하상굴착시 보강방안

2.1 하상굴착시 기초 보강방안

하상굴착시 교각부 기초 노출은 횡방향 지지에 의한 문제점이 발생되며, 모형실험을 통한 보강범위를 산정하여 안정성을 확보할 수 있는 보강방안을 제시하였다. 기초 형식에 따른 보강방안은 다음 표 1~2와 같다.

표 1. 현장타설말뚝 기초형식에 따른 보강 방안

구분	굴착깊이가 얇은 경우	굴착깊이가 중간인 경우	굴착깊이가 깊은 경우
개요도			
보강방안	설계지반면이 불변하여 기초안정성에 문제가 없다.	지반보강을 통한 수평안정성 확보, 세굴 방지공 설치.	하부 개축
비고	계획하상고 확대기초의 저면 아래로 내려가지 않는 경우	말뚝의 노출길이가 말뚝길이의 1/6 이하인 경우	계획하상고가 말뚝기초의 지지 지반고보다 내려가는 경우

표 2. 우물통 기초 형식에 따른 보강 방안

구분	굴착 깊이가 얇은 경우	굴착깊이가 중간인 경우
개요도		
보강방안	기초안정성에 문제가 없다. 세굴방지공 설치.	콘크리트를 타설하여 우물통 단면을 확대 시키는 방안.
비고	우물통 추가로 노출되는 높이가 본래 주변장 높이의 1/3 이하인 경우	우물통이 추가로 노출되는 높이가 본래 주변장 높이의 1/3 이상인 경우

3. 모형실험

3.1 대표단면 및 지반조건

본 연구에서는 현장타설말뚝(ϕ 1500mm) 및 우물통 기초(ϕ 4500mm)에 대한 현장지반조사 결과를 수행하여 각각의 대표단면도를 그림 1.과 같으며, 지반조건은 표 3.과 같다.

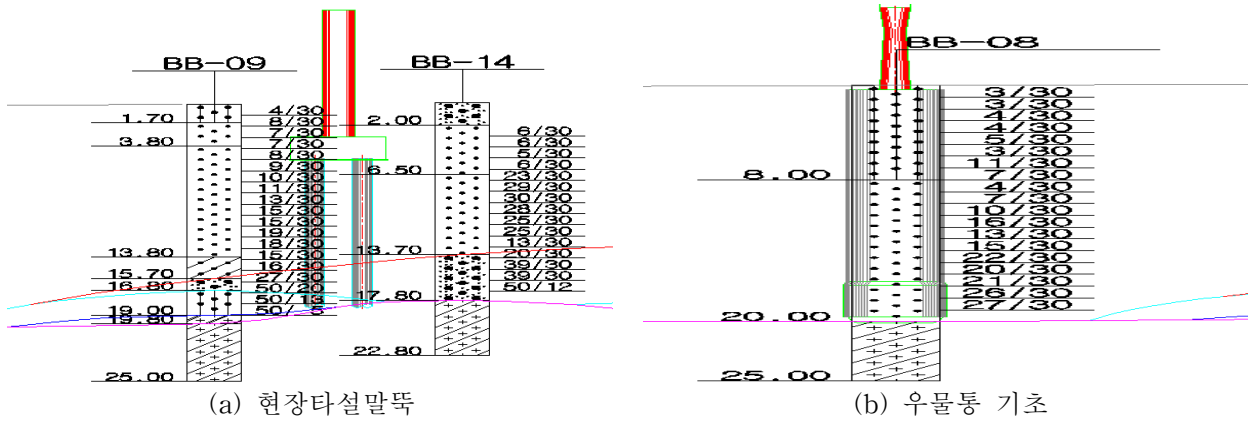


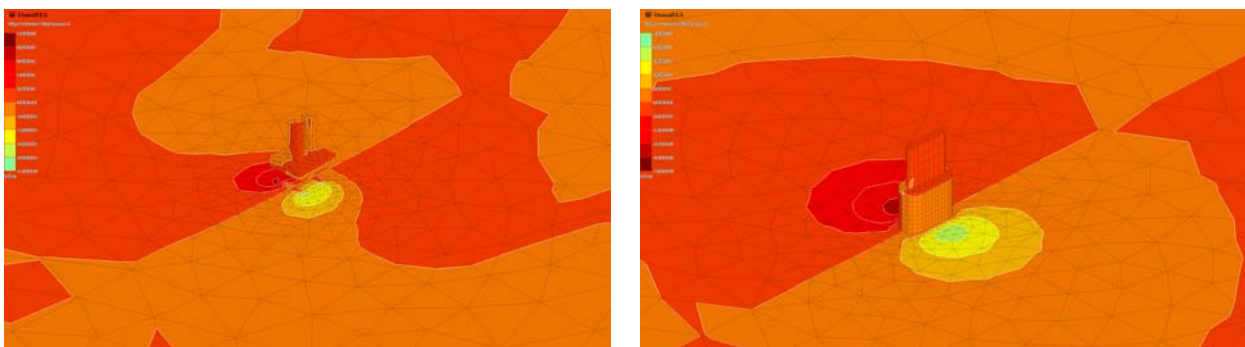
그림 1. 대표단면도

표 3. 지반조건

구 분	지층 심도(m)		
	사질토	풍화토	풍화암
현장타설 말뚝(ϕ 1500mm)	5.8	2.7	2.2
우물통 기초(ϕ 4500mm)	12.0	-	5.0

3.2 상사법칙을 고려한 예비해석

본 연구에서는 지반조건을 고려한 모형실험시 토조크기의 한계에 따라 결과에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 실제 거동에 따른 영향범위를 고려하여 토조 벽면강성에 영향을 받지 않는 크기로 상사법칙을 적용하였으며, 토조 벽면강성에 영향을 받지 않는 범위 확인을 위하여 3차원 유한요소해석을 실시하고 하중재하에 따른 최대영향범위를 산정하여 상사법칙을 고려한 상사율을 결정하였으며, 예비해석 결과를 정리하면, 그림 2와 같다.



(a) 현장타설말뚝 교축방향 변위도

(b) 우물통 기초 교축방향 변위도

그림 2. 상사법칙 적용을 위한 예비해석 결과

그림 2의 상사법칙을 고려한 예비해석 결과를 살펴보면, 기초 주변 지반에서 하중재하방향 15m까지 전체변위의 99%가 발생한 것으로 확인되었으며, 실내모형시험을 위한 모형토조가 60(B)×150(L)×60(H)이므로 이를 고려하여 상사율을 적용하면 현장타설말뚝 기초의 경우 약 1/30 정도, 우물통 기초의 경우 약 1/45 정도의 상사율을 적용하는 것이 적정한 것으로 확인하였다.

3.3 현장타설말뚝 및 우물통 기초 모형실험

3.3.1 모형실험 조건

본 연구에서는 현장타설말뚝 및 우물통 기초에 대한 상사법칙을 고려한 예비해석에서 상사율을 결정하여 모형실험 조건을 나타내었다. 또한 모형실험 모식도는 그림 3.과 같으며, 현장타설말뚝 및 우물통 기초에 적용한 모형실험 조건은 표 4.와 같다.

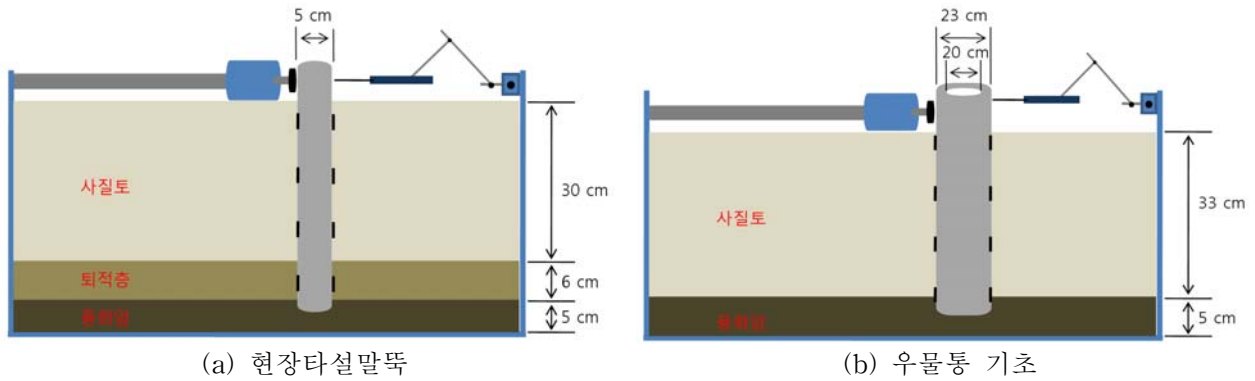


그림 3. 모형실험 모식도

표 4. 모형실험 조건

구 분	재하방법	횡하중 (t)	치수(cm)		하상굴착		상사율
			모형토조(cm)	모형말뚝(cm)	단계	깊이 (cm)	
현장타설말뚝	하중제어	0.3	150(L) × 60(B) × 60(H)	5.0 × 52	5	5	1 : 30
우물통 기초	하중제어	1.0		23 × 43(두께 3.0)	6	5	1 : 45

비고 : 실제 현장타설말뚝의 하상굴착시 말뚝기초의 1/6 노출을 고려한 모형실험 수행
 실제 우물통 기초의 하상굴착시 우물통 기초의 1/7 노출을 고려한 모형실험 수행

3.3.2 모형실험 방법

본 연구에서는 현장타설말뚝과 우물통 기초에 대하여 대표단면을 상부구조물의 종류, 작용하중, 시험 목적을 고려하여 각각 1/30과 1/45의 크기로 제작하여 모형토조에 원지반 및 암반지반을 조성하였으며, 횡방향 재하시 일방향 재하로써 말뚝두부가 자유단인 조건에서 하중제어방식으로 모형실험을 수행하였다. 또한 하중계와 말뚝측면에 Strain gauge를 부착하여 자동측정장치(Date Logger)와 연결하였으며, 각각의 말뚝기초에 대하여 하상굴착단계를 고려하여 횡하중- 변위거동 특성값을 측정하였다. 또한 모형 실험과정을 정리하면, 그림 5~6.과 같다.

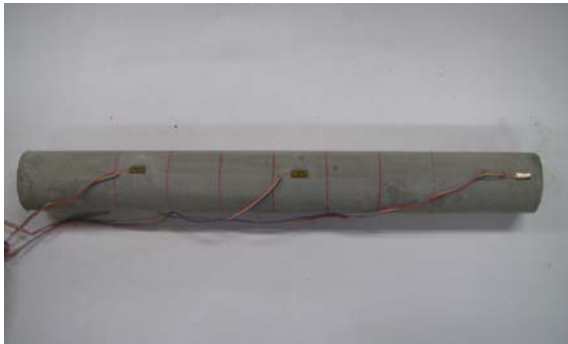


(a) 하중재하장치



(b) Data 수집장치(TDS-302)

그림 4. 모형실험 부속자재



(a) 모형말뚝 제작



(b) 말뚝기초+지반조성



(c) 하중재하



(d) 준설

그림 5. 현장타설말뚝 모형실험 방법



(a) 우물통 기초 제작



(b) 우물통 기초+지반조성



(c) 하중재하



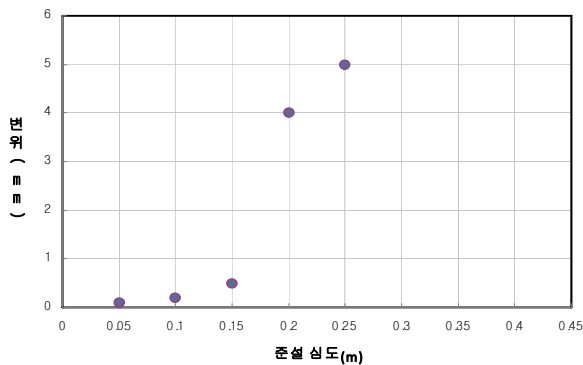
(d) 준설

그림 6. 우물통 기초 모형실험 방법

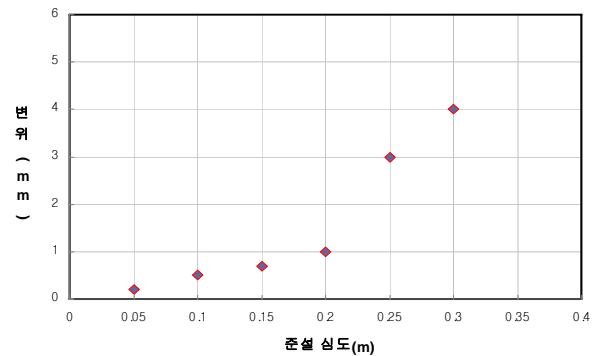
3.4 모형실험 결과분석

3.4.1 준설심도에 따른 수평변위 결과

본 연구에서는 모형실험을 하중제어 방식으로 수행하여 횡하중 재하시 굴착단계별 준설심도에 따른 수평변위 관계 결과를 도출하였다. 아울러 현장타설말뚝 및 우물통 기초에 대한 모형실험 결과를 정리하면, 그림 7.과 같다.



(a) 현장타설말뚝



(b) 우물통 기초

그림 7. 준설심도에 따른 수평변위 결과

그림 7.의 굴착단계에 따른 수평변위 결과를 살펴보면, (a)의 경우 상사율 (1/30) 적용시 하중제어로 횡하중은 0.3t을 재하하여 수행하였으며, 준설심도는 5cm간격으로 5단계로 굴착하여 수행한 결과 굴착 3 단계 시점인 굴착심도 15cm 이후 급격한 변화 후 최종 굴착심도 25cm에서 (a)의 경우 수평변위는 5mm 발생한 것으로 평가되었다. 또한 우물통 (b)의 경우 상사율(1/45) 적용시 하중제어로 횡하중은 1.0t을 재하하여 실시하였으며 준설심도는 5cm간격으로 총 6단계로 굴착하여 수행한 결과 굴착 3단계 시점인 굴착심도 20cm이후 급격한 변화 후 최종 준설심도 30cm에서 우물통 기초의 수평변위는 4mm 발생한 것으로 평가되었다.

3.4.2 실제 준설시 안정성 검토 결과분석

본 연구에서는 현장타설말뚝 및 우물통 기초에 대하여 상사율을 고려한 모형실험을 수행하여 굴착단

계별 준설심도에 따른 수평변위 관계를 분석하였다. 이를 토대로 그림 8.과 같이 모형실험에서 얻은 결과를 실제 기초 크기로 환산하여 준설에 따른 안정성을 확보할 수 있는 준설심도를 평가하였다.

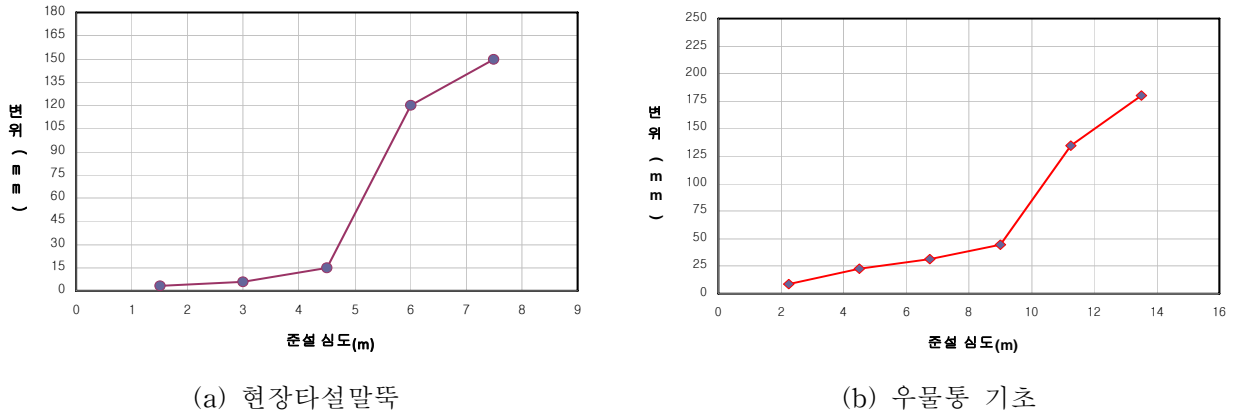


그림 8. 실제 준설심도에 따른 수평변위 결과

실제기초 단면으로 환산하여 굴착심도에 따른 수평변위 결과를 살펴보면, 말뚝기초 허용 수평변위 기준은 직경의 1% 이내이므로, 현장타설말뚝 15mm이상, 우물통 기초는 45mm이상 수평변위 발생시 안정성을 확보하지 못하므로 그림 8.과 같이 허용수평변위 기준 이상인 경우에 대하여 (a)의 경우 최적의 굴착심도는 각각 4.5m이내, (b)의 경우 9.0m 이내로 하상굴착시 안정성을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

4. 수치해석

4.1 개요

본 연구에서는 대표적인 현장타설말뚝(ϕ 1500mm) 및 우물통 기초(ϕ 4500mm) 적용구간에 대하여 하상굴착시 말뚝의 노출길이가 증가할수록 횡하중에 대한 안정성을 확보 여부 및 적정 준설심도를 모형실험을 통해 산정하였다. 이에 3차원 연속체 수치해석을 모형실험과 동일한 조건으로 수행하여 수치해석 결과와 모형실험과의 비교 분석을 통한 신뢰성을 검증하였다.

4.2 지반강도 정수

현장타설말뚝 및 우물통 기초 해석시의 지층구성 및 각 지층별 지반강도 정수는 기존에 시행한 지반조사 결과를 활용하여 지반강도 정수를 적용하였으며, 표 5.와 같다.

표 5. 수치해석에 적용한 지반강도 정수

구 분	단위중량(kN/m ³)	내부마찰각(°)	점착력(kPa)	변형계수(MPa)	포아송비
사질토	18.0	30	10	20	0.35
풍화토	19.0	30	20	30	0.35
풍화암	21.0	33	30	170	0.32

4.3 수치해석 결과

4.3.1 횡하중 재하시 수치해석 결과 분석

본 연구에서는 현장타설말뚝 및 우물통 기초의 횡하중 재하시 모형실험과 동일한 조건으로 수행하였다. 굴착단계별 준설심도에 따른 수평변위 결과는 그림 9와 같으며, 수치해석 결과는 그림 10~11과 같다.

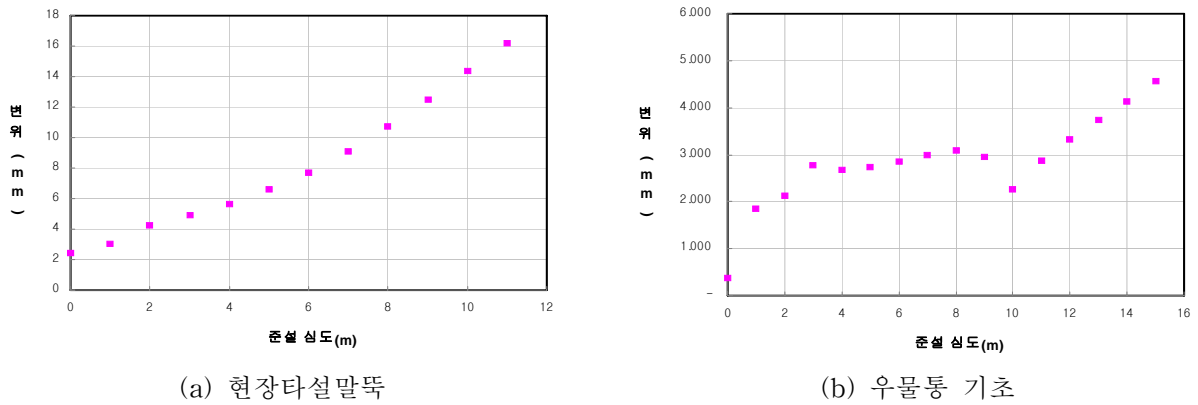


그림 9. 횡하중 재하시 수치해석을 통한 수평변위 결과

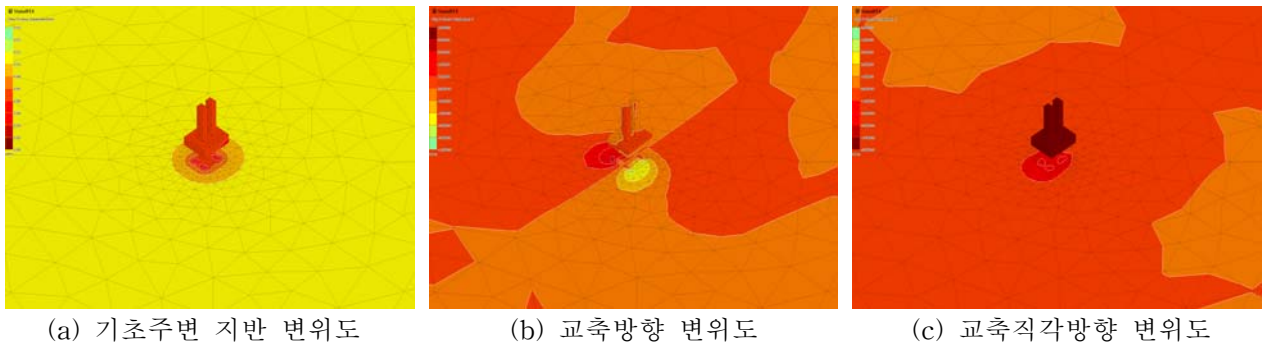


그림 10. 횡하중 재하시 현장타설말뚝 수치해석 결과

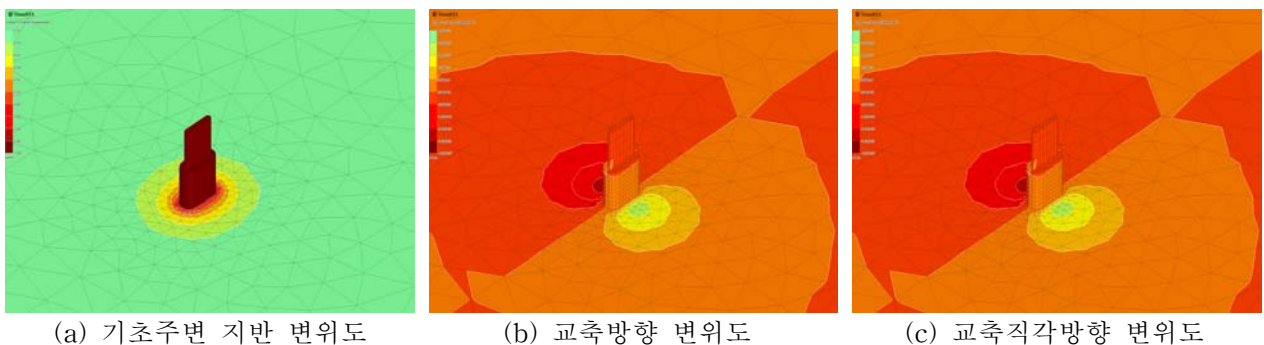


그림 11. 횡하중 재하시 우물통 기초 수치해석 결과

그림 9~11의 횡하중 재하시 수치해석 결과를 살펴보면, 준설심도가 깊어질수록 수평변위는 거의 선형적으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 단, (a)의 경우 준설심도가 7.0m, (b)의 경우 준설심도가 10.0m 되

는 지점부터 기울기가 급해지는 경향을 보이고 있는 것으로 확인하였다. 이는 준설초기에는 현장타설말뚝과 우물통 기초가 깊은기초와 같은 하중지지 메카니즘으로 지지력이 발현되다가, 준설심도가 깊어져 하중지지 메카니즘이 얕은기초의 거동 메카니즘으로 변화하여 이에 따른 지반의 전단변형에 의한 수평변위가 추가적으로 발생되었기 때문으로 생각된다. 수치해석 결과 변위량의 절대값은 설계기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

4.4 모형실험과 수치해석 결과 비교분석

본 연구에서는 신뢰성을 검증하고자 횡하중 재하시 횡하중-변형에 대하여 모형실험 및 수치해석 결과 값을 비교·분석하여 정리하면, 그림 12.와 같다.

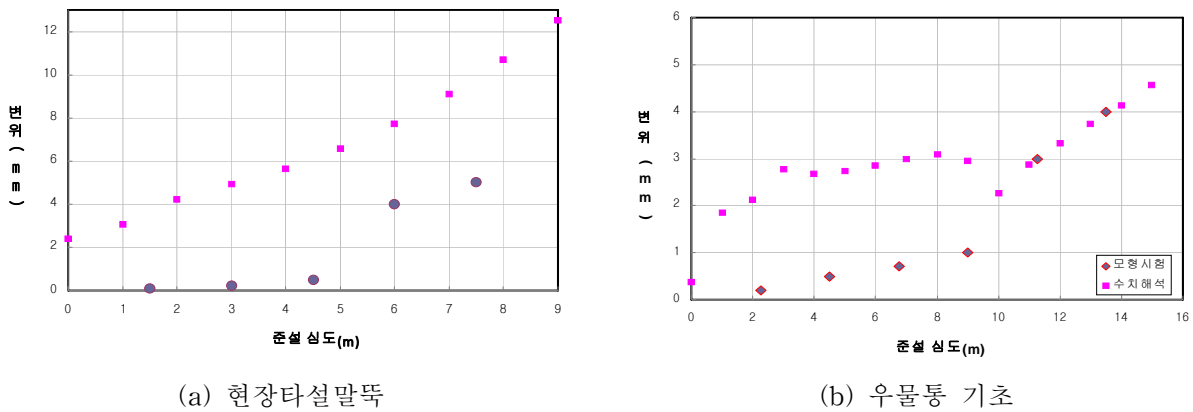


그림 12. 모형실험과 수치해석 비교분석 결과

그림 12.의 모형실험과 수치해석결과를 비교분석한 결과를 살펴보면, (a)의 경우 준설시 약 1/3 기초길이까지이며, (b)의 경우 약 1/2 기초길이까지 준설시 수평변위의 큰 변화가 없고 그 이상 굴착시 수평변위가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 굴착단계를 모형실험과 수치해석과의 결과가 잘 부합되는 것으로 신뢰성을 확보하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 현실적으로 실물의 현장재하시험을 수행하여야 하나 현장여건과 과다비용이 문제점으로 발생하므로 실내에서 모형실험을 재현하여 실제 지반조건을 최대한 모사하여 수치해석을 통한 현장타설말뚝 및 우물통 기초에 대한 상사율을 적용하여 모형실험과 수치해석을 병행하여 횡하중 재하시 굴착단계별 교각부의 안정성 확보 여부 및 최적의 준설심도를 산정하여 보강범위를 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- 1) 모형실험 결과, 현장타설말뚝은 상사율(1/30) 적용시 횡하중 0.3t 재하시 굴착심도 15cm 이후 급격한 변화 후 최종 굴착심도 25cm에서 수평변위는 5mm 발생한 것으로 평가되었다. 우물통 기초의 경우 상사율(1/45) 적용시 횡하중 1.0t을 재하시 굴착심도 20cm 이후 급격한 변화 후 최종 굴착심도 30cm에서 수평변위는 4mm 발생한 것으로 평가되었다.
- 2) 실제기초의 안정성 검토 결과, 현장타설말뚝의 경우 굴착심도에 따른 수평변위 15mm 이내로 발생시 현장타설말뚝의 최적의 준설심도는 4.5m 이내의 범위에서 안정성을 확보하는 것으로 평가되었다. 또한 우물통 기초의 경우 수평변위 45mm 이내로 발생시 최적의 준설심도는 9.0m 이내의 범위

에서 안정성을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

- 3) 현장타설말뚝 및 우물통 기초의 횡하중 재하시 3차원 연속체 수치해석 결과, 깊은 기초의 하중지지 메카니즘의 변화에 의한 변위발생 경향을 고려할 경우, 말뚝기초의 경우 굴착심도는 7.0m 이내, 우물통 기초의 경우 10.0m 이내로 분석되어 결과값으로 비교해 볼 때, 모형실험결과와 유사한 것으로 분석되었다.
- 4) 모형실험 결과 및 수치해석 결과를 종합해보면, 현장타설말뚝의 설계 횡하중을 받는 말뚝기초의 허용 수평변위 기준 이내인 경우 준설심도는 4.5m 이내, 우물통 기초의 경우 준설심도는 9.0m 이내가 준설시 최적의 보장범위인 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 김홍택, 이중재, 정종민, 윤창진(2009), “변형률 썩기모델을 이용한 다층지반에서의 횡하중을 받는 말뚝의 적용성 평가”, **한국지반환경공학회**, 제 10권 제 7호, pp. 159-165.
2. 장부식, 황정순, 류준원, 이용기, 김홍택 (2006), “다층지반에 근입된 대구경 현장타설 말뚝의 하중전달이 분석,” **한국지반공학회, 2006 봄학술발표회 논문집**, pp. 980~987.
3. 한국지반공학회 (1997), “깊은기초”, 지반공학시리즈, 구미서관.
4. 한국지반공학회 (2009), “구조물 기초설계기준 해설”
5. Reese, L. C. and Welch, R. C. (1975), “Laterally Loading of Deep Foundations in Stiff Clay”, *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 101, No. GT.7, pp. 633~649.
6. Murchison, J. M. and O'Neill, M. W. (1984), “Evaluation of p-y Relationships in Cohesionless Soil”, *Analysis and design of pile foundations, ASCE*, New York, pp. 174~191.